

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**O IMPACTO DE UMA LAGOA RECEPTORA DE  
EFLUENTES INDUSTRIAIS CONTENDO BORO EM  
UM AQUÍFERO RASO**

Tatiana Luiz dos Santos Tavares

Orientador: Prof. Dr. Ricardo César Aoki Hirata

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia

SÃO PAULO  
2006

Dedico esse trabalho aos meus pais e aos meus avós pela educação e incentivo à busca do conhecimento e pelo apoio, mesmo à distância, em todas as horas.

A todos os amigos que acreditaram, estimularam e colaboraram para a realização do presente trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Se todas as pessoas que participaram na execução e finalização deste trabalho fossem citadas, este item seria maior que a própria dissertação. Portanto, tentei resumir o máximo possível. Obrigada a todos.

Meus agradecimentos especiais ao Prof. Dr. Ricardo César Aoki Hirata pela orientação, principalmente pela sua grande paciência e confiança depositada durante todo este período.

Ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (IGc-USP), em especial ao Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental pela oportunidade de realizar este trabalho, dispondo de toda a infra-estrutura.

À unidade industrial onde o estudo foi realizado, por permitir a utilização das dependências e dos dados para a confecção desta dissertação.

À ASA -Assessoria & Serviços Ambientais por todo apoio concedido ao longo deste trabalho e principalmente pela amizade e confiança demonstradas, em nome de Lidia Senf Fernandez e Sérgio H. Ogihara.

Aos laboratórios de Química e ICP do DMG-IGc-USP e Hidrogeoquímica II do CEPAS pela realização das análises químicas das amostras de água subterrânea e ao Laboratório Bioagri Ambiental pela realização das análises químicas de solo e água subterrânea.

A todos os funcionários do IGc, biblioteca, gráfica, secretaria de pós-graduação e portaria.

À Msc. Cláudia Varnier e ao Prof. Dr. Reginaldo Bertolo pela luz no fim do túnel.

Apesar da pouca convivência, aos bons momentos vividos com os amigos do Laboratório de Modelos Físicos, Alexandra Suhogusoff, Marcos Mondin (Zeca), Ingo Wahnfried, Carlos Maldaner, Luiz Ferrari e Cláudia Varnier.

À super amiga e companheira em todas as horas, sempre disposta a ajudar Evelyn Brandão ("TatiPika"), pelas várias ajudas, incluindo a execução das análises granulométricas. À uma das melhores amigas, pelo empenho nas campanhas de amostragem e eterno incentivo, Liza (Topêra).

Ao colega de trabalho Itamar Barbosa, prezado Lafon, pela ajuda na impressão final, e por toda sua solidariedade, paciência, tranquilidade e amizade.

A um amigo muito querido que acompanhou lado a lado boa parte dessa etapa e incentivou cada momento a continuação do trabalho, mesmo depois de perdidas as esperanças, Claudionor Damasceno.

Ao Zé, primeiramente por sua existência e pelo seu incansável apoio na finalização deste trabalho, preenchendo-a com momentos de descontração.

Ao meu pai pela segurança e estímulo de todas as horas e à minha mão pelo eterno amor e carinho.

# ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
<b>2. OBJETIVOS</b>	<b>12</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>12</b>
<b>3.1. Boro: Aspectos Gerais</b>	<b>12</b>
<b>3.2. Fontes de Boro</b>	<b>15</b>
<b>3.3. Comportamento Geoquímico do Boro</b>	<b>15</b>
3.3.1. Solo	15
3.3.2. Água e Sedimento	21
3.3.3. Neutralização <i>in situ</i> do H <sup>+</sup> em lagos	23
<b>3.4. Efeitos Nocivos do Boro</b>	<b>25</b>
<b>3.5. Legislações, Normas e Padrões sobre a Qualidade das Águas</b>	<b>26</b>
<b>4. ÁREA DE ESTUDO</b>	<b>29</b>
<b>4.1. Localização e Vias de Acesso</b>	<b>29</b>
<b>4.2. Aspectos Socio-Econômicos</b>	<b>29</b>
<b>4.3. Histórico de Uso e Ocupação do Solo</b>	<b>31</b>
<b>4.4. Aspectos Fisiográficos</b>	<b>31</b>
4.4.1. Geologia	32
4.4.2. Hidrogeologia	35
<b>5. MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>37</b>
<b>5.1. Execução de sondagens e Amostragem de Solo</b>	<b>37</b>
<b>5.2. Amostragem Indeformada de Solo</b>	<b>40</b>
<b>5.3. Amostragem de Solo e Sedimento do Lago</b>	<b>40</b>
5.3.1. Análises Granulométricas	43
5.3.2. Análises Mineralógicas	44
5.3.3. Análises Químicas	44
5.3.4. CTC, pH do Solo e Teor de Matéria Orgânica	44
<b>5.4. Instalação de Poços de Monitoramento</b>	<b>45</b>
5.4.1. Piezômetros	46
<b>5.5. Levantamento topográfico</b>	<b>47</b>
<b>5.6. Ensaios de condutividade hidráulica do tipo <i>Slug Test</i></b>	<b>48</b>
<b>5.7. Determinação das Condições de Fluxo da Água Subterrânea</b>	<b>48</b>
<b>5.8. Amostragem de Água Subterrânea</b>	<b>49</b>
<b>5.9. Amostragem de Água Superficial</b>	<b>51</b>
5.9.1. Análises Químicas	52
<b>5.10. Confiabilidade dos Resultados Analíticos e Tratamento dos Dados</b>	<b>53</b>
<b>6. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>	<b>55</b>
<b>6.1. Fontes Potenciais de Impacto do Subsolo</b>	<b>55</b>

6.1.1.	Fonte Primária de Boro	55
6.1.2.	Outras Fontes de Contaminação	56
6.1.3.	Composição Química do Efluente	56
<b>6.2.</b>	<b>Contexto Hidrogeológico da Área</b>	<b>58</b>
6.2.1.	Variação do Nível de Água	58
6.2.2.	Potenciometria	60
6.2.3.	Cálculo da Velocidade da Água Subterrânea	71
6.2.3.1.	Ensaio de Amostras Indeformadas	71
6.2.3.2.	Ensaio de Condutividade Hidráulica Saturada	71
6.2.3.3.	Velocidade da Água Subterrânea	73
<b>6.3.</b>	<b>Caracterização do Meio Poroso</b>	<b>75</b>
6.3.1.	Descrição Visual do Material de Perfuração	75
6.3.1.1.	Sedimento de Fundo da Lagoa e Solo Subjacente	75
6.3.2.	Caracterização Textural do Solo e Sedimento de Fundo	78
6.3.2.1.	Ensaio de Granulometria	78
6.3.3.	Caracterização Química do Solo e Sedimento de Fundo	80
6.3.3.1.	Análises Mineralógicas	80
6.3.3.2.	Boro (ICP-AES)	80
6.3.3.3.	pH, M.O. e CTC	84
<b>6.4.</b>	<b>Hidrogeoquímica</b>	<b>87</b>
6.4.1.	Controle de Qualidade	87
6.4.2.	Classificação das Águas Subterrâneas	89
6.4.3.	Contaminação das Águas Subterrâneas por Boro	96
6.4.4.	Comportamento Geoquímico do Boro – Lago x Aquífero	103
<b>7.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>106</b>
<b>8.</b>	<b>RECOMENDAÇÕES</b>	<b>111</b>
<b>9.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>113</b>
<b>10.</b>	<b>ANEXOS</b>	<b>120</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1: Diagrama Eh-pH para o sistema B-O-H (BROOKINS, 1988).....	14
Figura 3.2: Adsorção para $B(OH)_4^-$ no solo (SPOSITO, 1989).....	17
Figura 4.1: Localização da área de estudo.....	30
Figura 4.2: Mapa geológico regional. Fonte: Mapa Geológico do Estado de São Paulo – Região Administrativa 03 e Região Administrativa 02 (Parcial) - IPT (1978). Escala original: 1:200.000. ....	34
Figura 5.1: Localização das atividades realizadas.....	39
Figura 5.2: Diagrama de SHEPPARD (1954) de classes texturais. ....	43
Figura 6.1: Comparação de cargas hidráulicas ao longo do tempo. ....	59
Figura 6.2: Comparação de cargas hidráulicas ao longo de um ano hidrogeológico (2005). ....	59
Figura 6.3: Mapa potenciométrico no entorno do lago (julho de 2004). ....	61
Figura 6.4: Mapa potenciométrico geral (outubro de 2004).....	62
Figura 6.5: Mapa potenciométrico geral (março de 2005). ....	63
Figura 6.6: Mapa potenciométrico geral (outubro de 2005).....	64
Figura 6.7: Variação dos gradientes hidráulicos (i) ao longo do tempo.....	66
Figura 6.8: Comparação de cargas hidráulicas entre o lago, PZs e PMs.....	67
Figura 6.9: Resíduo entre as campanhas de janeiro de 2005 e outubro de 2004, em metros. ....	68
Figura 6.10: Resíduo entre as campanhas de março e janeiro de 2005.....	69
Figura 6.11: Resíduo entre as campanhas de outubro e março de 2005. ....	69
Figura 6.12: Resíduo entre as campanhas de outubro de 2005 e outubro de 2004. ....	70
Figura 6.13: Seções geológicas A-B e C-D. ....	77
Figura 6.14: Concentração de boro no solo e sedimento de fundo ao longo do tempo. ....	81
Figura 6.15: Percentuais de erros obtidos versus número de amostras analisadas. ....	88
Figura 6.16: Diagramas de Piper (março e outubro de 2005). ....	90
Figura 6.17: Razão entre os cátions Na e Ca nas amostras analisadas. ....	91
Figura 6.18: Mapa com delimitação aproximada das composições das águas. ....	93
Figura 6.19: Comportamento do boro x tempo. ....	98
Figura 6.20: Comportamento do boro x distância da principal área fonte. ....	98
Figura 6.21: Comportamento do boro x profundidade dos poços.....	99
Figura 6.22: Variação do comportamento do boro em área ao longo do tempo. ....	100
Figura 6.23: Variação do comportamento do $Cl^-$ e do $Na^+$ em área ao longo do tempo. ....	102
Figura 6.24: Seção geológica A-A' mostrando as variações químicas e físico-químicas nos meios em estudo. ....	105

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 5.1 – Campanhas de amostragens de solo, sedimento de fundo e solo subjacente do lago. ....	42
Tabela 5.2 – Análises realizadas em amostras deformadas de solo.....	43
Tabela 5.3 – Limites de detecção das análises químicas para boro. ....	44
Tabela 5.4 – Características construtivas dos poços de monitoramento instalados durante o presente estudo (julho e setembro de 2004).....	46
Tabela 5.5 – Campanhas de amostragem de água superficial e subterrânea. ....	51
Tabela 5.6 – Equipamentos utilizados para a determinação dos parâmetros físico-químicos.....	52
Tabela 5.7 – Relação dos parâmetros analisados em laboratório e respectivos métodos analíticos. ....	52
Tabela 5.8 – Limites de detecção obtidos para cada parâmetro. ....	52
Tabela 6.1 – Parâmetros analisados nos efluentes industrial e sanitário.....	56
Tabela 6.2 – Cargas hidráulicas e gradientes hidráulicos médios no entorno do lago ao longo do tempo e CH mínimas na área fabril. ....	60
Tabela 6.3 – Comparação entre os gradientes hidráulicos e entre as campanhas de medição de nível. .	65
Tabela 6.4 – Relação entre cargas hidráulicas do lago e aquífero superficial. ....	67
Tabela 6.5 – Resultados dos ensaios de granulometria e densidade do solo. ....	71
Tabela 6.6 – Resultados dos ensaios para parâmetros físicos do solo. ....	71
Tabela 6.7 – Comparação entre os valores calculados da condutividade hidráulica (K) e o material geológico. ....	72
Tabela 6.8 – Velocidades de fluxo subterrâneo.....	74
Tabela 6.9 – Resultados das análises granulométricas das amostras de solo, sedimento de fundo e solo subjacente. ....	79
Tabela 6.10 – Resultados das análises químicas do solo e sedimento de fundo. ....	82
Tabela 6.11 – Matriz de correlação entre os parâmetros químicos analisados no solo e sedimento de fundo, com a granulometria. ....	86
Tabela 6.12 – Matriz de correlação entre os parâmetros químicos e físico-químicos na água (março/2005). ....	95
Tabela 6.13 – Matriz de correlação entre os parâmetros químicos e físico-químicos na água (outubro/2005). ....	95
Tabela 6.14 – Matriz de correlação entre os parâmetros químicos e físico-químicos na água entre as diversas campanhas (JUL/04, MAR/05 e OUT/05). ....	95
Tabela 6.15 – Comparação entre as concentrações de boro nos meios em estudo ao longo do tempo. ....	103
Tabela 6.16 – Comparação entre parâmetros químicos e físico-químicos nos diferentes meios. ....	105

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO I - PERFIS DESCRITIVOS DAS SONDAGENS E POÇOS DE MONITORAMENTO (2004)

ANEXO II - RELAÇÃO DE SONDAGENS E AMOSTRAS DE SOLO (2004)

ANEXO III - MEDIÇÕES DE NÍVEL DE ÁGUA

ANEXO IV - GRÁFICOS DE SLUG TESTs

ANEXO V - CÁLCULOS DA VELOCIDADE DE FLUXO SUBTERRÂNEO

ANEXO VI - RESULTADOS DAS ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS

ANEXO VII - DIFRATOGRAMAS DRX

ANEXO VIII - RESULTADOS pH, MO, CTC

ANEXO IX - CÁLCULO DOS PERCENTUAIS DE ERROS OBTIDOS COM O BALANÇO IÔNICO

ANEXO X - RESULTADOS DE PARÂMETROS QUÍMICOS E FÍSICO-QUÍMICOS NAS ÁGUAS  
SUPERFICIAL E SUBTERRÂNEA

## RESUMO

O boro ocorre normalmente em baixas concentrações nas águas naturais destinadas ao abastecimento humano e agrícola, variando amplamente nas águas superficiais e subterrâneas. Embora apresente importância à saúde e ao ambiente, estudos detalhados sobre suas concentrações e seu comportamento em aquíferos ainda são restritos no Brasil. Este trabalho tem como objetivos, estudar e avaliar o impacto causado por uma lagoa receptora de efluentes industriais tratados no Aquífero Taubaté, em uma planta automotiva localizada no Município de Taubaté (SP).

O estudo abrange um aquífero raso do tipo livre, heterogêneo, com valores de condutividade hidráulica variando de  $1,08 \times 10^{-5}$  m/s a  $1,7 \times 10^{-7}$  m/s. A recarga ocorre em toda a área fabril não impermeabilizada, bem como pela lagoa, sendo as zonas de descarga locais compostas por dois córregos.

Os mapas potenciométricos referentes às campanhas de amostragem de julho de 2004 e março e outubro de 2005 apresentam fluxo radial da água subterrânea do lago para o aquífero e deste para as zonas de descarga locais.

Os métodos utilizados consistiram na caracterização química e físico-química das águas de 26 poços de monitoramento instalados no entorno do lago, bem como da água superficial do lago, do solo do aquífero, do sedimento de fundo da lagoa e do solo subjacente aos sedimentos, todos amostrados em março e outubro de 2005.

As análises dos parâmetros químicos e físico-químicos das águas subterrâneas e superficiais indicaram contaminação da água subterrânea ocasionada pela lagoa receptora de efluentes, com concentrações de boro superiores àquelas permitidas por lei (0,5mg/L). A pluma caracterizada tem maior comprimento de 120m e profundidade de até 10m.

O monitoramento ao longo de um ano hidrológico permitiu identificar três ambientes hidroquímicos distintos no aquífero: bicarbonatadas sódicas, cloretadas sódicas e mistas sódicas, com teores variáveis de sulfato. A presença de altas concentrações de sódio, cloreto e sulfato são decorrentes dos lançamentos de efluente na lagoa e à influência desta em relação ao aquífero.

Verificou-se que os sedimentos de fundo do lago formam uma barreira hidroquímica retendo as maiores concentrações de boro (211,6 - 257,6mg/L), tornando-se conseqüentemente uma fonte secundária desse elemento, cujo comportamento está diretamente relacionado com o pH da água do lago. O sistema lago/aquífero quanto ao boro encontra-se em equilíbrio após dois anos e meio do cessar da fonte primária, constituída por óleos solúveis contendo boro, porém, a pluma de boro ainda encontra-se em movimento no sentido do fluxo.

## ABSTRACT

The boron (B) occurs naturally at low concentrations in surface and ground waters used to human supply and irrigation. Although concentration  $>1\text{mg/L}$  can cause health and environmental problems, detailed studies on transport and fate of B in aquifers are restricted in Brazil.

This study investigated the impacts on groundwater quality caused by an industrial (automobile plant) effluent lagoon into a shallow, unconfined sandy clay aquifer (Taubaté Aquifer) in Taubaté (São Paulo, Brazil). This aquifer is heterogeneous with a hydraulic conductivity varying from  $1,08 \times 10^{-5}\text{m/s}$  to  $1,7 \times 10^{-7}\text{m/s}$ . The recharge occurs in the whole area (except where the surface is impermeable), and associated to the lagoon. The potentiometric maps indicate radial direction flow from the lagoon to the aquifer and then toward the two streams located in the east and west sides of industrial plant. The present study is based on chemical analyses of groundwater (26 shallow monitoring wells – 3 to 15m deep), surface water (effluent lagoon), and soil and sediments from the bottom of the lagoon, aquifer and surface surround the lagoon in different period of the year. Analyses performed for major elements, B, pH, Eh, and electric conductivity showed the existence of a B plume surrounding the lagoon with maximum length of 120m and deep of 10m. The three different hydrochemical environments were identified: sodium bicarbonate, sodium chloride and sodium mixed waters, with variable concentrations of sulfate. The sediment of the bottom of the lagoon acts as a hydrochemical barrier adsorbing the B. This sediment is a secondary source of this contaminant. The adsorption mechanism is controlled by the pH of lagoon water. The lagoon/aquifer system is in relative equilibrium after 2 ½ years since the interruption of the release of B into the lagoon, however, the plume in low concentration is still moving through the aquifer.

## 1. INTRODUÇÃO

Embora o boro seja um elemento traço das águas naturais, indubitavelmente altas concentrações desse elemento podem ser inconvenientes em águas para consumo humano e irrigação. No Brasil ainda não existe uma preocupação com a presença desse elemento em águas subterrâneas, mas a concentração de boro em águas naturais tem sido reconhecida recentemente como um importante fator em estudos ambientais no mundo.

O consumo de doses relativamente altas de boro afeta o sistema nervoso central e ingestões prolongadas deste elemento resulta em uma síndrome clínica conhecida como borismo. Concentrações menores que 1mg/L na água são geralmente consideradas inofensivas aos seres humanos (ACCIOLY & NEVES, 1976).

As principais formas de entrada do boro na água são através de lançamentos de efluentes municipais contendo perboratos presentes na composição de detergentes e de escoamento de áreas que utilizam herbicidas e fertilizantes contendo boro (WAGGOTT, 1969, apud WHO, 1998). Segundo MOORE (apud BONACIN, 2001) mundialmente, mais de 50% da produção de boro destina-se à indústria de cerâmica e esmaltes cerâmicos, seguido da indústria de sabões e detergentes (8-40%) e na formulação de produtos agrícolas, como fertilizantes e herbicidas (como elemento traço).

Baixas concentrações de boro são encontradas em águas naturais destinadas ao abastecimento humano ou agrícola. A concentração é comumente menor do que 0,1mg/L e concentrações superiores a 1mg/L são raramente encontradas (ACCIOLY & NEVES, 1976). Segundo WHO (1998), a concentração de boro em águas para consumo humano varia entre 0,01 e 15,0mg/L, com a maioria dos valores situados abaixo de 0,5mg/L. Uma média global da concentração de boro em águas para consumo humano, considerada entre 0,1 e 0,3mg/L, pode ser utilizada como quantidade ingerida tolerável (TI).

Uma investigação ambiental realizada no entorno de uma lagoa receptora de efluentes industriais de uma planta automotiva, localizada no Município de Taubaté, diagnosticou altas concentrações de boro na água da lagoa, bem como na água subterrânea do aquífero raso, composto por sedimentos da Sequência Pindamonhangaba. Tal investigação também demonstrou que o boro está presente no sedimento de fundo deste lago.

Sabe-se que o boro é um elemento mundialmente encontrado em efluentes descartados em rede pública, devido à dificuldade de eliminação em tratamentos físico-químicos e biológicos tradicionais. Na área investigada, o boro é advindo de um óleo solúvel sintético, utilizado em substituição ao óleo mineral a partir da década de 90. Ao longo de sua utilização, verificou-se que o boro não era suficientemente reduzido durante o tratamento físico-químico na ETRI, o

que acarretou em um acúmulo deste elemento no lago ao longo dos anos de descarte, afetando conseqüentemente a qualidade da água subterrânea no aquífero raso.

Portanto, um estudo mais detalhado sobre o boro e seu comportamento fez-se necessário na área, determinando o impacto causado pela lagoa receptora de efluentes no recurso hídrico subterrâneo, através do monitoramento da qualidade das águas subterrânea, superficial, bem como do solo.

## 2. OBJETIVOS

A proposta desse estudo consiste na caracterização do impacto causado pelo boro em uma lagoa receptora de efluentes industriais pós-tratamento na qualidade da água subterrânea do aquífero raso subjacente. Este estudo avaliou também o comportamento geoquímico do boro nos diversos ambientes relacionados, tais como na própria água da lagoa, no sedimento de fundo, no solo subjacente ao sedimento de fundo e na água subterrânea.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1. BORO: ASPECTOS GERAIS

O boro (B) é um semi-metal encontrado sob a forma de boratos em oceanos, rochas sedimentares, carvão, folhelhos e em alguns solos. Amplamente distribuído na natureza, ocorre em concentrações de aproximadamente 10mg/kg na crosta terrestre, variando entre 5mg/kg em basaltos e 100mg/kg em folhelhos (WOODS, 1994). Nota-se que a concentração deste elemento em sedimentos argilosos é muito maior que em rochas ígneas, especialmente em argilas evaporíticas e argilas de sedimentos oceânicos profundos. O boro é extremamente enriquecido em cinzas de carvão e presumivelmente é derivado do material vegetal (GOLDSCHMIDT & PETERS, 1932, apud WALKER, 1975).

Concentrações de boro no solo variam entre 10mg/kg e 300mg/kg, com média em 30mg/kg, dependendo do tipo de solo, quantidade de matéria orgânica e recarga. Excesso deste elemento na solução dos solos ocorre normalmente em depósitos geologicamente jovens, solos áridos, solos derivados de sedimentos marinhos e solos contaminados por fontes de poluição antrópicas, sendo a água de irrigação uma das principais (WHO, 1998).

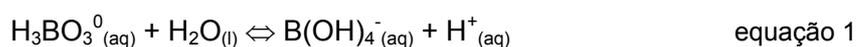
O B é o único não metal pertencente ao grupo de micronutrientes das plantas, não sendo essencial para os animais, nem para o homem (ADRIANO, 1986). Baixas concentrações de boro são essenciais ao crescimento das plantas, porém águas contendo 1 a 2mg/L ou mais de boro têm um efeito adverso sobre a vegetação, demonstrando um reduzido limiar entre deficiência e toxicidade para o boro em plantas. Considera-se 25mg/kg o valor limite tolerável para o conteúdo total de boro nos solos de cultivo (MERCK, 1990). Menos de 5% do total de boro no solo está disponível para absorção das raízes das plantas (GUPTA, 1968, apud GUPTA et al., 1985). O boro é um constituinte significativo das águas marinhas, ocorrendo com concentrações de aproximadamente 4,5mg/L (WEAST *et al.*, 1985 apud WHO, 1998). Concentrações de boro ao redor do mundo variam amplamente nas águas superficiais (0,001mg/L a 360mg/L) e nas águas subterrâneas (<0,3mg/L a >100mg/L). Concentrações de

boro nas águas superficiais do Japão, África do Sul e América do Sul estão geralmente abaixo de 0,3mg/L. Baixas concentrações de boro são encontradas em águas naturais destinadas ao abastecimento humano ou agrícola. A concentração é comumente menor do que 0,1mg/L e concentrações superiores a 1mg/L são encontradas nos Estados Unidos e no Chile (WHO, 1998). Segundo MERCK (1990), o conteúdo de boro nas águas naturais superficiais não afetadas por atividade antrópica varia entre 0,01 e 0,05mg/L e nas águas residuais varia entre 0,10 e 0,40mg/L.

Segundo WHO (1998), a concentração de boro em águas para consumo humano varia entre 0,01 e 15,0mg/L, com a maioria dos valores situados abaixo de 0,5mg/L. Uma média global da concentração de boro em águas para consumo humano, considerada entre 0,1 e 0,3mg/L, pode ser utilizada se necessário estabelecer uma quantidade ingerida tolerável (TI). Concentrações recomendadas de boro em águas para consumo humano são 0,3mg/L (Norway Shd), 0,3mg/L (WHO), 5mg/L (Canada CWQG) e 0,5mg/L (Russia MoH) (REIMANN & CARITAT, 1998).

Devido à sua afinidade com o oxigênio, não se encontra na natureza em estado livre e sim formando um eletrólito fraco como o ácido bórico ( $H_3BO_3$ ), forma química estável nos mais variados ambientes, com condições de pH variando entre 0 e 10 e condições de Eh entre -0,6 e 1,2V, em um sistema B-O-H (BROOKINS, 1988), como se pode observar na Figura 3.1.

O ácido bórico ( $H_3BO_3$ ) é um ácido fraco ( $K_n = 5,8 \times 10^{-10}$ ), portanto, não dissociado e age como ácido de Lewis aceitando um íon hidróxido para formar o ânion borato, como mostra a seguinte equação:



Em soluções aquosas com baixas concentrações de boro ( $\leq 0,025M$ ), ocorrem essencialmente as formas monoméricas  $[B(OH)_3]$  e  $[B(OH)_4]$ . Em soluções com pH inferiores a 7, ocorre predominantemente a forma não dissociada  $[B(OH)_3/H_3BO_3]$ , moderadamente solúvel em água. Em soluções com pH superiores a 9, ocorrem os produtos dissociados, sendo o ânion metaborato  $B(OH)_4^-$ , a principal espécie em solução. Em soluções com pH variando entre 6 e 11 e com altas concentrações de boro ( $>0,27mg/L$ ), os ânions poliboratos altamente solúveis em água  $[B_3O_3(OH)_4^-]$ ,  $[B_4O_5(OH)_4^{2-}]$  e  $[B_5O_6(OH)_4^-]$  também são formados, sendo que o equilíbrio entre ácido bórico, íons monoboratos e íons poliboratos na solução aquosa é rapidamente reversível (KEREN & BINGHAM, 1985; WHO, 1998). O hidroxiborato  $[B(OH)_4^-]$  é formado em solução a partir da adição do  $OH^-$ , podendo a porcentagem destes íons na solução ser calculada a partir da primeira constante de hidrólise ( $K_1 = 5,8 \times 10^{-10}$ ), reação que envolve a formação desses íons, calculadas por BUNDSCHUH *et al.* (1994) para os pHs 5,5 (0,02%), 7 (0,63%) e 8 (6,3%).

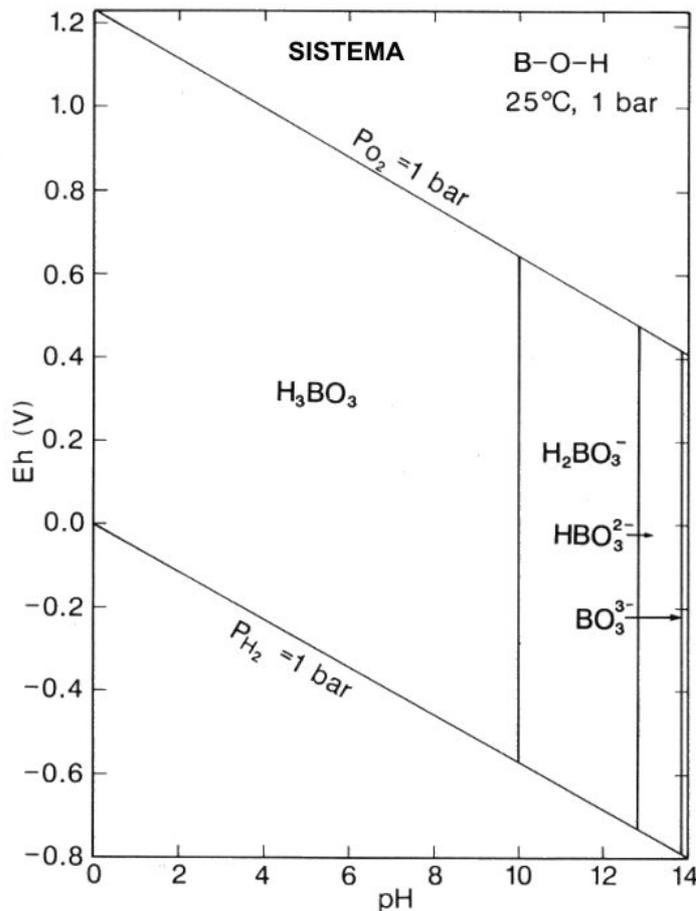


Figura 3.1: Diagrama Eh-pH para o sistema B-O-H (BROOKINS, 1988).

Os íons boratos presentes em soluções aquosas estão essencialmente em seu estado totalmente oxidado, nenhum processo aeróbico parece afetar sua especiação e nenhum processo de biotransformação foi reportado. Compostos orgânicos de boro são muito incomuns na natureza. Os boratos não podem ser degradados, mas complexos de boratos com matéria orgânica e ligados a superfícies minerais podem ser alterados por lixiviação ou mudanças de pH (WHO, 1998).

Devido à correlação do boro com a salinidade das águas e por ser encontrado em grandes concentrações em ambientes marinhos, o boro é utilizado em alguns casos como indicador de paleossalinidade e conseqüentemente de paleoambientes (WALKER, 1975), através da medição de seu conteúdo nas illitas, de onde é dificilmente desorvido. Os compostos de boro são ótimos traçadores em função da alta solubilidade, porém sua baixa reatividade está relacionada à composição do aquífero, ou seja, se este contiver pouco material (argila, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio e matéria orgânica) que adsorva o boro e se o pH for ácido a neutro. Além dessas características, plumas de contaminação podem ser determinadas se naturais ou antrópicas através de estudos dos isótopos de boro.

## **3.2. FONTES DE BORO**

Os produtos comerciais de boratos mais importantes são o bórax (decahidrato de tetraborato dissódico), pentahidrato de bórax (pentahidrato de tetraborato dissódico), perborato sódico e ácido bórico.

O boro entra naturalmente no meio ambiente principalmente através da alteração de rochas, volatilização de ácidos bóricos da água do mar e atividade vulcânica. Fontes antropogênicas comuns são a agricultura, lixo, queima de madeira, geração de energia através da combustão de carvão e óleos, manufatura de produtos de vidro, uso de boratos e perboratos em residências e indústrias (incluindo sabões e detergentes), mineração e processamento de boratos, percolados do tratamento de madeira e papel, indústrias químicas e disposição de resíduos e lodos. Além desses usos, os boratos são utilizados também no isolamento de fibras de vidro, fabricação de vidros de borosilicatos e como retardantes de fogo. O borato sódico e o ácido bórico são amplamente utilizados em produtos cosméticos como maquiagens, desodorantes e cremes para pele e cabelo (WHO, 1998). As principais formas de entrada do boro na água são através de lançamentos de efluentes municipais contendo perboratos presentes na composição de detergentes e de escoamento de áreas que utilizam herbicidas e fertilizantes contendo boro (WAGGOTT, 1969).

Segundo MOORE (1989), mais de 50% da produção mundial de boro destina-se à indústria de cerâmica e esmaltes cerâmicos, seguido da indústria de sabões e detergentes (8-40%) e como elemento traço na formulação de produtos agrícolas, como fertilizantes e herbicidas.

O aumento do aproveitamento industrial dos compostos de boro, especialmente o emprego de perborato sódico na produção de detergentes modernos, acarreta em um aumento na concentração de boro introduzida nos cursos de água, já que os boratos passam através das estações de tratamento tradicionais de águas residuais sem sofrerem grandes alterações em suas concentrações (WHO, 1998).

## **3.3. COMPORTAMENTO GEOQUÍMICO DO BORO**

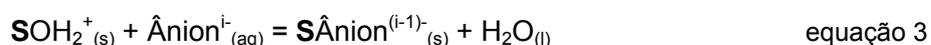
### **3.3.1. Solo**

Vários mecanismos podem fixar o boro aos minerais do solo, tais como a troca aniônica, precipitação de boratos insolúveis com sesquióxidos, sorção de íons borato e ácido bórico molecular formação de complexos orgânicos e adsorção em argilominerais (ADRIANO, 1986).

Em contraste com os argilominerais, os aluminossilicatos amorfos, óxidos e hidróxidos de metais e matéria orgânica têm carga superficial altamente dependente do pH. O pH onde a concentração de cargas de superfícies positivas é igual à concentração de cargas de superfície negativas é chamado de Ponto Zero de Carga (ZPC). Soluções com valores de pH abaixo do

ZPC favorecem a troca aniônica devido à maior disponibilidade do íon  $H^+$  para protonação dos grupos hidróxidos de superfície, carregando a superfície dos minerais positivamente. No entanto, a troca aniônica não é um mecanismo muito observado, devido às fracas ligações eletrostáticas envolvidas.

Alguns ânions importantes não poliméricos presentes na solução do solo são adsorvidos, dentre eles pode-se citar:  $B(OH)_4^-$ ,  $CO_3^{2-}$  e  $HCO_3^-$ ,  $COO^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $H_3SiO_4$ ,  $PO_4^{3-}$ ,  $HPO_4^{2-}$  e  $H_2PO_4^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$  e  $MoO_4^{2-}$  e  $HMoO_4^-$ . Os mecanismos de adsorção dos ânions, assim como dos cátions são complexação de superfície (*outer-sphere* e *inner-sphere*) e associações de íons difusos. A complexação de superfície *outer-sphere* de ânions envolve coordenação para um grupo hidróxido ou amino protonados, ou para um metal cátion de superfície, com a presença de uma molécula de água entre o grupo positivo da superfície e o ânion complexado. A complexação de superfície *inner-sphere* envolve coordenação para sítios de ácido de Lewis (combinação entre um cátion de metal e uma molécula de água na interface da superfície sólida) criados ou já existentes na superfície mineral. Quase sempre o mecanismo desta coordenação é a troca por um ligante hidróxido protonado ( $OH_2^+$ ), com liberação de uma molécula de água (equações 2 e 3), em superfícies minerais com cargas variáveis. Os ânions borato, fosfato e carboxilato são adsorvidos principalmente em espécies de complexo *inner-sphere*.



Para o  $B(OH)_4^-$ , a protonação é significativa em  $pH < 9,2$ . Assim que o pH aumenta a partir de 5,0, há um gradual aumento na população dos íons boratos na solução, refletindo um gradual aumento na adsorção até atingir um patamar máximo até o pH 9,2, quando a concentração de  $OH_2^+$  começa a cair, devido à diminuição da concentração de  $H^+$  e predominância do  $OH^-$ , tornando o ânion  $B(OH)_4^-$  estável (Figura 3.2) (SPOSITO, 1989).

Estudos da adsorção do boro por óxidos têm sugerido que o principal mecanismo de adsorção é a troca de ligantes com grupos hidróxidos de superfície, como mostram as equações 2 e 3 (SPOSITO, 1989).

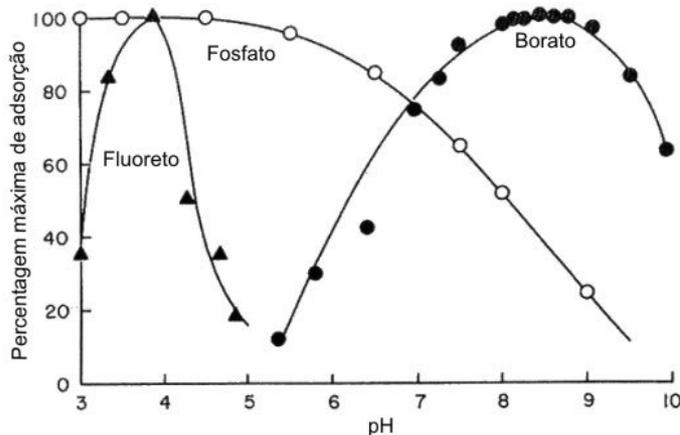
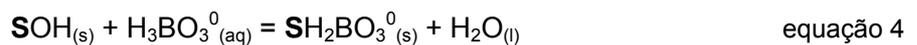


Figura 3.2: Adsorção para  $B(OH)_4^-$  no solo (SPOSITO, 1989).

O modelo de capacitância constante descreve o mecanismo específico de adsorção do boro mostrado na Figura 3.2 (SPOSITO, 1989) através da seguinte equação:



Experimentos de lixiviação em colunas de solos têm mostrado que altas concentrações de boro no solo não são facilmente lixiviáveis por água, devido à sua forte ligação na superfície das partículas de solo através do complexo de superfície *inner-sphere* (SPOSITO, 1989).

Segundo KEREN & BINGHAM (1985), o melhor mecanismo que explica a adsorção do boro nos minerais do solo é a Aproximação por Complexação de Superfície, concluindo que a superfície dos materiais adsorventes consiste de discretos sítios que interagem especificamente com o íon adsorvido. Assim, o boro pode ser especificamente adsorvido em superfícies de argilominerais e de hidróxidos de alumínio através do mecanismo referido como troca de ligantes, através do qual a espécie adsorvida desloca o  $OH^-$  (ou  $H_2O$ ) da superfície mineral, formando parcialmente ligações covalentes com os cátions estruturais (HINGSTON *et al.*, 1974, apud KEREN & BINGHAM, 1985). Tais autores sugerem que este mecanismo independe do sinal das cargas superficiais cristalinas (equação 4), assim como ocorre na complexação de superfície *inner-sphere*.

BIGGAR & FIREMAN (1960) determinaram que a fixação desse elemento em solos ocorre por três mecanismos a saber: adsorção física (molecular), na qual o boro é fixado à superfície do solo por ligações de *Van der Waals*; troca aniônica; ou precipitação química. Os mesmos concluíram que a adsorção inicial é provavelmente molecular na natureza, seguida pela formação de compostos na superfície do solo o que resulta em um aumento de sítios específicos de adsorção, particularmente em soluções do solo com altas concentrações de boro. As altas concentrações, ligações químicas de íons borato com íons hidróxidos protonados na superfície do solo, resultam na fixação do boro a silício, alumínio e ferro solúveis. O mesmo

mecanismo foi observado por COUCH & GRIM (1968) para a captação de íons borato pelas superfícies minerais das argilas.

SIMS & BINGHAM (1968) sugeriram que o mecanismo de adsorção do boro em óxidos de Fe e Al deve-se à troca de ânions com íons hidróxidos. Esse tipo de troca de ligantes com a superfície reativa de grupos hidróxidos (OH<sup>-</sup>) é um mecanismo pelo qual ânions tornam-se adsorvidos especificamente sobre superfícies minerais de óxidos de Fe e Al. A adsorção específica de ânions produz uma mudança no ponto de carga zero (ZPC) dos minerais para um valor mais ácido. A diminuição do ZPC após a adsorção do boro foi observada na bohemita (FRICKE & LEONHARDT, 1950, apud GOLDBERG & GLAUBIG, 1985), pseudo-bohemita (ALWITT, 1972 apud GOLDBERG & GLAUBIG, 1985), gel de hidróxido de alumínio (BEYROUTY *et al.*, 1984, apud GOLDBERG & GLAUBIG, 1985) e magnetita (BLESA *et al.*, 1984, apud GOLDBERG & GLAUBIG, 1985), indicando adsorção específica nesses minerais. A troca de ligantes com os grupos reativos de hidróxidos da superfície sobre as bordas quebradas dos argilominerais também tem sido sugerida como mecanismo de adsorção do boro nesses minerais (KEREN & TALPAZ, 1984).

HATCHER & BOWER (1958) determinaram que existe um equilíbrio entre o boro nas fases sólidas e líquidas. Tais autores determinaram adsorção reversível em solos com valores de pH entre 6,6 e 7,7, cuja espécie predominante de boro na fase aquosa era o ácido bórico não dissociado. Sendo esta molécula pouco reativa com as superfícies dos minerais, o principal mecanismo de retenção sugerido foi a adsorção molecular do ácido bórico com sítios de adsorção específicos.

O boro é adsorvido nas superfícies das partículas do solo, sendo que o grau de adsorção depende do tipo de solo, pH do solo, salinidade, conteúdo de matéria orgânica, conteúdo de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio e conteúdo de argila (SPRAGUE, 1972, apud WHO, 1998).

ELRASHIDI & O'CONNOR (1982) ainda observaram que coeficientes de correlação simples relacionam o B solúvel, nativo e adsorvido, tão bem quanto valores de coeficiente de adsorção (K) de Freundlich a algumas propriedades físicas e químicas investigadas nos solos, indicando que porcentagem de argila, porcentagem de carbono orgânico, capacidade de troca catiônica (CTC), superfície específica e condutividade elétrica medidas no extrato da saturação dos solos estudados foram correlacionados positivamente aos valores de K de Freundlich, bem como ao B nativo e sorvido. A inter-relação entre conteúdo de argila com a superfície específica e a CTC nos solos, pode explicar a alta correlação dos dois últimos parâmetros com as propriedades de adsorção do B nos solos. Outra importante observação foi que o pH do solo foi significativamente correlacionado com o B solúvel, mas pobremente correlacionável com o B

nativo e o adsorvido, talvez devido ao reduzido intervalo de pHs nos solos estudados (6,0 a 8,0).

O modelo de capacitância constante é um modelo químico de complexação de superfícies que usa o mecanismo de troca de ligantes para descrever adsorção específica de ânions. O modelo define explicitamente complexos de superfície *inner-sphere* e reações químicas, considerando as cargas do adsorvente e do adsorvido (STUMM *et al.*, 1980, apud GOLDBERG *et al.*, 1993). Tal modelo tem sido utilizado com sucesso para descrever a adsorção do boro em vários óxidos de Fe e Al via troca de ligantes com grupos hidróxidos da superfície (GOLDBERG & GLAUBIG, 1985), em argilominerais via troca de ligantes com grupos aluminol (GOLDBERG & GLAUBIG, 1986a) e em solos (GOLDBERG & GLAUBIG, 1986b), como função do pH da solução. GOLDBERG *et al.* (1993) avaliaram os mecanismos de adsorção do boro em óxidos (goethita e gibbsita), em argilominerais (caulinita e montmorilonita) e em solos, utilizando o modelo químico de capacitância constante. Nesse estudo, diminuições do pH ZPC para esses minerais foram observadas com o aumento das concentrações de boro (gibbsita: 9,6 para 7,7, goethita: 8,5 para 7,1 e caulinita: 3,3 para 2,8). Os picos de adsorção do boro em relação ao pH foram obtidos entre 6 e 8 para a gibbsita, 7,5 a 8,5 para a goethita, entre 8,0 e 8,5 para a caulinita e entre 9,0 e 10,0 para a montmorilonita. Baseando-se na pequena dependência da força iônica e nas mudanças do ZPC, concluíram que a adsorção do boro nos minerais goethita, gibbsita e caulinita se dá através de uma forte ligação com complexos da superfície *inner-sphere*, resultando na difícil desorção do boro desses minerais. Para a montmorilonita, concluíram que a adsorção do boro se dá através da ligação com complexos da superfície *outer-sphere*, resultando na maior facilidade de desorção devido à fraca ligação que ocorre neste complexo.

GOLDBERG *et al.* (2000), utilizando o modelo químico de capacitância constante, relatou as características de adsorção do boro para 32 amostras de solo de zona árida e demonstrou que a adsorção do boro aumenta com o aumento do pH da solução, exibindo máxima adsorção em torno do pH 9 e o seu decréscimo, com posterior aumento do pH da solução. Esse comportamento parabólico é característico da adsorção do boro (Figura 3.2).

O comportamento de adsorção do B em vários minerais de óxidos de Fe e Al, cristalinos e amorfos, foi estudado por vários autores. SCHARRER *et al.*, 1956 (apud, GOLDBERG & GLAUBIG, 1985), estudaram a fixação do B em  $Al_2O_3$  e  $Fe_2O_3$ , e descobriram que ambos os minerais exibiram sorção crescente de B com crescentes pHs. Picos de adsorção ocorreram a pH 6 e 7 para  $Al_2O_3$  e pH 8 e 9 para  $Fe_2O_3$  e foram seguindo para um declínio gradual. SIMS & BINGHAM (1968) obtiveram comportamento similar de sorção do B em amorfos de hidróxidos de ferro e alumínio.

GOLDBERG & GLAUBIG (1985) demonstraram o comportamento da adsorção do B em vários óxidos de Fe e Al cristalinos e amorfos, utilizando o modelo químico de capacitância constante. A adsorção apresentou-se crescente em pHs baixos, exibindo um pico entre 7 e 8 e decrescendo em pHs altos, sendo que a magnitude de adsorção do B foi muito maior para materiais amorfos. A presença de  $\text{SO}_4^{2-}$  não limitou a adsorção do boro na hematita, indicando ausência de competição dos sítios de adsorção entre esses íons ou alta afinidade de adsorção para o  $\text{B}(\text{OH})_4^-$ .

SIMS & BINGHAM (1967) reportaram que hidróxidos de ferro e alumínio presentes como materiais entre camadas (*interlayer*), cobrindo partículas individuais ou impurezas, resultam no aumento da retenção do boro em camadas silicáticas. MARZADOORI *et al.* (1991) reportaram que a quantidade de boro adsorvido pelo solo foi consideravelmente maior após a remoção da matéria orgânica presente que possivelmente estava cobrindo sítios de adsorção compostos pelos óxidos de ferro e alumínio. BINGHAM *et al.* (1971) concluíram que a propriedade do solo mais importante que influencia a mobilidade do boro é a abundância de óxido de alumínio amorfo.

COUCH & GRIM (1968) determinaram que a adsorção do boro em argilas da família illita foi aumentada em soluções de solo com maiores concentrações de boro, proporcionalmente ao aumento da salinidade e temperatura da solução. Os pesquisadores também observaram a direta relação entre a área da superfície específica das argilas e a adsorção do boro nas illitas, caracterizando-a como inicialmente rápida, seguida pela difusão do boro para dentro da estrutura da argila, requerendo alguns meses para alcançar o equilíbrio. Dentre as argilas, a illita é a mais reativa com o boro e a caulinita, menos reativa (KEREN & MEZUMAN, 1981).

JASMUND & LINDER (1973) demonstraram que concentrações equimolares de cloreto, sulfato e nitrato em comparação com as concentrações equimolares de boro tiveram pouco efeito em sua adsorção, enquanto concentrações de fosfato reduziram apreciavelmente a adsorção do boro em argilominerais (caulinita, montmorilonita e illita). GOLDBERG & GLAUBIG (1986a) demonstraram que a adsorção do boro na caulinita foi levemente reduzida por concentrações de silicato, enquanto que na montmorilonita não houve competição entre o silicato e o boro, sugerindo que os sítios de adsorção do boro são específicos. GOLDBERG *et al.* (1996) pesquisaram a competição de sítios de adsorção entre os ânions nitrato, sulfato, molibdato e fosfato, com relação ao boro em argilominerais (caulinita e montmorilonita) e em dois solos de zona árida. Os autores demonstraram os efeitos de competição entre os ânions na seguinte ordem fosfato > molibdato > sulfato, concluindo que o ânion fosfato foi fortemente adsorvido, pouco efeito competitivo com a adsorção do boro foi observado, reforçando a hipótese de que os sítios de adsorção do boro são específicos e atuam independentemente na competição de outros ânions.

COMMUNAR *et al.* (2004) realizou testes de adsorção do boro em *batch tests* utilizando soluções com pH iguais a 7; 8,5 e 10 e em colunas de solo, com pH variando entre 7; 9,3 e 10. Através dos *batch tests*, os autores concluíram que a capacidade de adsorção do solo utilizado é independente do pH (dentre aqueles estudados), sendo que a maior adsorção observada com o aumento do pH está relacionada à mudança da forma química do boro ( $B(OH)_3 \Rightarrow B(OH)_4^-$ ), confirmada através dos pH utilizados nos experimentos. Os valores de adsorção obtidos em ambos os experimentos foram bem descritos pela equação de Langmuir e as isotermas de adsorção foram semelhantes para ambos os experimentos, em todo intervalo de pH utilizado. Nota-se que apesar do material ser composto por 80% de areia e 7% de argila (montmorilonita), com 0,85% de matéria orgânica e 0,9% de óxidos livres, ou seja, com reduzida concentração de sítios de adsorção, houve relativa adsorção do boro.

Muitos dos compostos superficiais de boro inicialmente formados por mecanismos de adsorção podem ser instáveis e lixiviados pela água. Entretanto, como resultado do equilíbrio que existe entre o boro adsorvido e dissolvido no solo, o boro adsorvido pode atuar como tampão, impedindo a lixiviação do boro em excesso dos solos (GRIFFIN & BURAU, 1974). A adsorção do boro pode variar de totalmente reversível a irreversível. A falta de reversibilidade pode ser resultado da formação de fase sólida nas superfícies dos minerais (RAI *et al.*, 1986, apud WHO, 1998) e /ou da lenta liberação do boro por difusão do interior de minerais de argila (GRIFFIN & BURAU, 1974).

HATCHER & BOWER (1958) demonstraram que a desorção do boro é reversível. Entretanto, ELRASHIDI & O'CONNOR (1982) observaram uma reversibilidade incompleta da adsorção em alguns solos do Novo México (USA), com altas concentrações de boro, assim como OKAZAKI & CHAO (1968) e RHOADES *et al.* (1970). Tal fato demonstra que o não conhecimento total a respeito da desorção do B, leva a médio prazo, reconhecer que a desorção do boro pode não ser reversível na maioria dos solos. A desconsideração da irreversibilidade da adsorção do soluto resultará na superestimação das concentrações de B em águas lixiviáveis e na possível taxa de remoção de B do solo/sedimento.

### **3.3.2. Água e Sedimento**

A adsorção/desorção é o único mecanismo significante que influencia o comportamento do boro na água (RAI *et al.*, 1986, apud WHO, 1998). A extensão da adsorção do boro depende do pH da água e da concentração de boro na solução. A maior adsorção do boro em partículas sólidas, preferencialmente argilas, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, e matéria orgânica, é observada em águas com pH variando entre 7,5 e 9,0 (WAGOTT, 1969; KEREN & MEZUMAN, 1981; KEREN *et al.*, 1981).

BARBER *et al.* (1988) mapearam uma pluma de contaminação proveniente de um ponto de infiltração de efluente sanitário tratado com concentrações traço de compostos orgânicos voláteis através da presença de boro (0 - 300µg/L). O boro foi um ótimo indicador da contaminação devido à sua origem ser exclusivamente da composição do efluente, ao pH do aquífero entre 5 e 7 que propicia a forma neutra e não dissociada do ácido bórico ( $H_3BO_3$ ) e à composição do material litológico do aquífero ser arenosa e cascalhosa, conferindo-lhe baixa reatividade para sorção, colaborando para que o boro tenha as características conservativas do cloreto, que apresentou mesma distribuição espacial e em profundidade (3500m de comprimento, 1100m de largura e 30m de profundidade), semelhante aos compostos orgânicos voláteis.

SIMSIMAN *et al.* (1987) investigaram plumas de boro, sódio e sulfato na água subterrânea advindas de lagos de disposição de cinzas de carvão de uma usina elétrica, a pelo menos 120m a jusante dos lagos, com profundidades entre 26 e 30m, sugerindo rápida infiltração e deslocamento do boro da lagoa para o aquífero. A espécie do boro predominante na solução com pH entre 7,1 e 8,8, obtida através de cálculo de equilíbrio químico utilizando-se o MINEQL (WESTALL *et al.*, 1976, apud SIMSIMAN *et al.*, 1987), foi o ácido bórico e apesar dessa forma química ter pouca afinidade com óxidos e argilominerais, observaram uma redução considerável das concentrações do boro entre o lago e o aquífero, de aproximadamente 40%.

COX *et al.* (1978) reportaram que 50% de boro foi lixiviado de uma amostra de 0,5g de cinza de carvão para água em um período de duas horas, sendo a razão de lixiviação crescente com o aumento da acidez da água. HOLLIS *et al.* (1988) observaram que 60% de boro foi removido de 6g de cinza de carvão após três extrações com pH igual a 9, enquanto que 100% de boro foi removido após duas extrações com pH igual a 6, indicando que soluções com pH alcalino adsorvem mais o boro.

CORWIN (1986) pesquisou a adsorção do boro em sedimentos, concluindo que este é um meio pelo qual o boro pode persistir por longos períodos de tempo em sistemas aquáticos, cuja desorção do boro de sedimentos poderia fornecer uma fonte de longa duração até o sistema alcançar o equilíbrio através do mecanismo da difusão, devido às diferenças de concentrações do boro na coluna de água e no sedimento localizado na interface água/sedimento e abaixo dela.

BUNDSCHUH *et al.* (1994) estudaram a contaminação da água subterrânea por boro advinda da infiltração de efluentes de uma mineradora de bórax em um curso de rio perene localizado no entorno da planta de produção, cujas concentrações de boro no rio em época de cheia alcançaram valores entre 2 e 13mg/L, e máximas concentrações de boro no aquífero observadas ao longo do rio nas proximidades da planta de produção, em torno de 6,2mg/L, sendo a concentração *background* de boro no aquífero em torno de 0,3mg/L. Se comparadas as

concentrações de boro no rio e no aquífero, observa-se que há uma reduzida atenuação do boro entre os meios, mesmo com o pH da água do rio entre 7,0 e 8,8 e o material da base do rio ser composta por mais de 50% de cascalho grosso a fino e areia. Tal fato demonstra que apesar do material não ter aparentemente materiais com potencial de adsorção do boro e o pH da água do rio ser levemente alcalino, há relativa adsorção do boro. No entanto, no aquífero, o boro pôde ser avaliado como traçador, devido à composição do material geológico do aquífero (cascalho arenoso com pouca argila) e ao pH mais ácido da água subterrânea, entre 6,5 e 7,3.

BONACIN (2001) estudou o impacto causado por indústrias cerâmicas na região dos lagos em Santa Gertrudes caracterizando a contaminação por B das águas superficiais das lagoas ([B] até 54,2mg/L), do sedimento de fundo ([B] até 2261mg/kg), do solo ([B] até 3660mg/kg) e das águas subterrâneas, onde o boro alcançou altíssimas concentrações ([B] até 504mg/L), bem superiores àquelas encontradas nas lagoas.

### **3.3.3. Neutralização *in situ* do H<sup>+</sup> em lagos**

A compreensão do comportamento geoquímico específico de ambientes lacustres é importante em estudos hidrogeoquímicos que envolvem esse meio, já que a maioria dos elementos químicos estará de alguma forma relacionada com o ciclo redox nesses ambientes.

Processos biogeoquímicos *in situ* podem ser a maior fonte de alcalinidade, especialmente em lagos pobres em carbonatos. Basicamente, a interação entre os produtos orgânicos de fotossíntese advinda de colonização de algas e bactérias cianofíceas como agentes redutores (doadores de e<sup>-</sup>) e os principais oxidantes [nitratos, sulfatos ou hidróxidos de Fe(III) e Mn(III, IV)] é acompanhada por consumo de prótons (H<sup>+</sup>), aumentando a alcalinidade e o pH. Durante o crescimento da biomassa, a absorção de cada equivalente de ânion conservativo causa um equivalente aumento na alcalinidade, portanto, a produção de Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, redução do SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> e produção de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> aumentam a alcalinidade (STUMM & MORGAN, 1996).

O estrato mais profundo e frio localizado abaixo da zona fototrópica (hipolímnio) e o sedimento são continuamente “titulados” com a colonização do fitoplâncton (STUMM & SCHONOR, 1995). Quanto maior a atividade das bactérias/algas, mais rápida é a exaustão dos receptores de elétrons (os oxidantes), diminuindo o Eh. Portanto, o Eh nos sedimentos pode ser uma indicação da extensão e do tipo de atividade bacteriana. Sedimentos reduzidos com espécies Fe(II) são comuns no hipolímnio.

A fotossíntese utiliza moléculas de hidrogênio, causando o decréscimo da concentração desses íons e, portanto, um aumento no pH. Por essa razão, o pH pode ser mais alto durante o dia e durante a estação de crescimento, quando a fotossíntese é máxima, podendo mudar também com a profundidade, devido à redução na fotossíntese e a outras reações químicas. A água do lago é um complexo cheio de adsorventes químicos eletrizados que impedem maiores

mudanças no pH. Essa habilidade de resistir a mudanças no pH é chamada de capacidade de tamponamento. Quando de um evento de poluição, há um aumento na produtividade do fitoplâncton devido a aumento de temperatura ou excesso de nutrientes denominado de eutrofização, resultando no aumento de pH e na capacidade de tamponamento do lago (WSDE, 2006).

### 3.4. EFEITOS NOCIVOS DO BORO

Um valor de coeficiente de partição octanol/água medido para o ácido bórico igual a 0,175, indica um baixo potencial de bioacumulação (BARRES, 1967, apud WHO, 1998). Experimentos de laboratório com organismos aquáticos têm confirmado esse potencial (THOMPSON *et al.*, 1976 ; SULOWAY *et al.*, 1983, apud WHO, 1998).

Apesar de o boro não se acumular em cadeias aquáticas, é acumulado principalmente nas folhas pelas plantas (EATON, 1944, apud WHO, 1998). Normalmente, o mecanismo de absorção do boro pelas raízes é um transporte ativo que requer energia, devido à menor concentração de boro no solo. Entretanto, quando este se encontra em altas concentrações, pode ser tóxico para algumas espécies de plantas e o mecanismo de absorção é a difusão passiva (BINGHAM *et al.*, 1970, apud WHO, 1998), sendo afetada pelo pH da solução do solo, temperatura, intensidade da luz e a concentração de outros elementos, como o cálcio e o potássio (WHO, 1998).

As bactérias são relativamente tolerantes em relação ao boro, sendo este um micronutriente essencial para as cianobactérias e diatomáceas (WHO, 1998).

Poucos estudos têm sido conduzidos para calcular os efeitos à saúde humana associados à exposição de compostos contendo boro. Os dados disponíveis sugerem que a exposição está associada a efeitos irritantes reversíveis e de curto prazo no trato respiratório superior, nasofaringe e olhos.

As vias de exposição do boro ao ser humano podem ser as ingestões de água para consumo de fontes naturais ou municipais que contenham boro; o consumo de colheitas cultivadas em solos enriquecidos em boro, irrigadas com águas enriquecidas em boro, ou contaminadas com partículas de boro aerotransportadas; o consumo de organismos aquáticos habitantes de águas naturais ricas em boro; absorção de boro de preparados cosméticos ou médicos através de membranas mucosas ou eczemas na pele; e inalação, absorção dermal, ou ingestão acidental de produtos de limpeza, pesticidas ou fertilizantes. Em geral, as vias de exposição ao boro mais freqüentes são a ingestão de comida (65%) e em menor extensão, a ingestão de água (30%). As fontes mais ricas de boro são frutas, vegetais, legumes e nozes. Laticínios, peixes, carnes e a maioria dos grãos são fontes pobres de boro (WHO, 1998).

O ser humano ingere cerca de 1,3 a 4,5mg/dia de boro, sendo 75% deste eliminado através da urina (MOORE, 1989). O consumo de doses relativamente altas de boro afeta o sistema nervoso central e ingestões prolongadas deste elemento resulta em uma síndrome clínica conhecida como borismo. Concentrações menores que 1mg/L de boro na água são geralmente consideradas inofensivas ao homem (ACCIOLY & NEVES, 1976).

Os dados existentes demonstram efeitos de irritação do trato respiratório superior e olhos, sendo de curto prazo e reversíveis (WHO, 1998).

Numerosos estudos têm mostrado que o ácido bórico e o bórax são absorvidos pelo trato gastrointestinal e pelo trato respiratório, como indicado pelo aumento de boro no sangue, nos tecidos e urina, ou por efeitos tóxicos sistêmicos de indivíduos expostos ou animais de laboratório. Níveis de boro na urina, tecidos e sangue têm sido raramente reportados em casos de exposição humana fatal a boratos inorgânicos. A excreção do boro é relativamente rápida, ocorrendo em um período de alguns dias, com um tempo de meia vida de eliminação de 24h ou menos. A cinética de eliminação do boro foi avaliada em voluntários humanos que receberam ácido bórico via intravenosa e rotas orais (JANSEN *et al.*, 1984, apud WHO, 1998 ; SCHOU *et al.*, 1984, apud WHO, 1998). A meia vida para eliminação foi a mesma por ambas as rotas, de aproximadamente 21h.

De acordo com STOKINGER, 1981 (apud WHO, 1998), a menor dose letal para exposição humana ao ácido bórico é 640mg/kg de peso corpóreo pela exposição oral, 8600mg/kg para exposição dermal, e 29mg/kg pela injeção intravenosa. STOKINGER determinou que mortes poderiam ocorrer a doses entre 5 e 20g de ácido bórico total para adultos e abaixo de 5g total para crianças. LITOVITZ *et al.*, 1988 (apud WHO, 1998), determinou que doses letais potenciais para crianças estão entre 3 e 6g de ácido bórico total e entre 15 e 20g para adultos.

Evidências para carcinogenicidade do boro e compostos de boro em humanos não é avaliável devido à inexistência de estudos. Os compostos de boro têm sido classificados pela USEPA (1994) no grupo D, isto é, não classificável para carcinogenicidade humana.

### **3.5. LEGISLAÇÕES, NORMAS E PADRÕES SOBRE A QUALIDADE DAS ÁGUAS**

#### Solo e Água Subterrânea

Atualmente no Brasil a qualidade das águas subterrâneas é estabelecida em âmbito federal, com base no Padrão de Potabilidade estabelecido pela Portaria 518, publicada no DOU em 25/03/04.

As águas subterrâneas são especificamente regulamentadas no Estado de São Paulo pela Lei 6.134 de 02 de junho de 1988 e pelo seu regulamento, Decreto 32.955 de 07 de fevereiro de 1991, onde é estabelecido que o padrão de qualidade para águas subterrâneas, assim como para águas pluviais, é a potabilidade.

Em dezembro de 1999 o órgão ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) publicou um relatório que propõe, para o Estado de São Paulo, valores orientadores a serem utilizados na proteção da qualidade dos solos e águas subterrâneas, da saúde pública, bem como na gestão das áreas contaminadas, através de um sistema denominado RAI, onde:

- **R** é o valor de referência de qualidade, que indica o nível de qualidade para um solo considerado limpo ou a qualidade natural das águas subterrâneas, o qual é estabelecido com base em resultados de análises químicas e físicas em amostras de solo e águas subterrâneas ou em limites de detecção dos métodos analíticos adotados na CETESB;
- **A** é o valor de alerta, que é a média aritmética entre os valores R e I, que indica uma possível alteração da qualidade natural dos solos e águas subterrâneas, com caráter preventivo e, quando excedido, requer investigações detalhadas e monitoramento;
- **I** é o valor de intervenção, que indica o nível de contaminação acima do qual existe risco à saúde pública, requerendo alguma forma de intervenção na área, sendo derivado através de modelo matemático de exposição humana para análise de risco.

A função do sistema RAI é prover uma orientação quantitativa no processo de avaliação da qualidade do solo e das águas subterrâneas, assim como fornecer subsídios ao controle de áreas contaminadas e suporte à decisão sobre a urgência e meta de remediação, com vistas à proteção da saúde humana.

Os valores orientadores para gerenciamento de áreas contaminadas foram reavaliados pela CETESB e aprovados em Reunião de Diretoria em 26/7/01, com validade de 4 anos, sendo publicado em novo relatório (CETESB, 2001). Nesse documento a CETESB propôs apenas um limite padrão de qualidade para água subterrânea: o padrão para INTERVENÇÃO baseado em análise de risco e apoiado nos limites de potabilidade brasileiros supracitados.

Os valores orientadores foram reavaliados pela CETESB no período de 4 anos e aprovados em Reunião de Diretoria em 23/11/05, novamente com validade de 4 anos, sendo publicado no DOESP em 01/12/05. A aplicação dos Valores de Intervenção para substâncias que tenham sofrido alterações para valores mais restritivos em relação aos publicados em 2001 só serão aplicados a partir de 1º de junho de 2006.

Vale ressaltar que a CETESB adota o Padrão Holandês como referência subsidiária no caso de parâmetros que não estão incluídos na lista dos padrões CETESB. Em pareceres recentes, a CETESB vem exigindo, subsidiariamente, também como apoio para os parâmetros não incluídos nos dois padrões anteriores, os valores de *Preliminary Risk Goals* (PRGs) da lista “EPA – Region IX” que são valores baseados em análise de risco efetuadas com dados genéricos.

Dentre a legislação citada, não há valores orientadores de referência, alerta ou intervenção para a qualidade dos solos do Estado de São Paulo quanto ao boro, assim como não existe limite de potabilidade deste elemento na água, segundo o Padrão de Potabilidade estabelecido pela Portaria 518, publicada no DOU em 25/03/04.

No entanto, dentre os valores orientadores para o gerenciamento de áreas contaminadas reavaliados pela CETESB e aprovados em Reunião de Diretoria em 23/11/05, o valor de INTERVENÇÃO para água subterrânea quanto ao parâmetro boro foi determinado igual a 500µg/L (0,5ppm).

Dentre os padrões de qualidade considerados pela CETESB como referência de apoio no caso de parâmetros inexistentes na lista de Valores Orientadores, o Padrão Holandês e valores PRGs (*Preliminary Remediation Goals*) para águas de distribuição pública da USEPA (*United States Environmental Protection Agency – Region 9*), apenas o último contém um valor baseado em análise de risco genérica de 7,3mg/L.

Informações gerais a respeito do boro foram obtidas no programa de monitoramento e investigação de água subterrânea de Minnesota (Minnesota Pollution Control Agency – GWMAP). Segundo essa referência, apesar de a USEPA não dispor de um padrão legal de potabilidade (MCL – Maximum Contaminant Level) para o boro, o Departamento de Saúde de Minnesota estabeleceu um limite baseado em risco de 0,6mg/L. Segundo a agência ambiental do Oregon (EUA), a USEPA tem considerado 0,6ppm como o limite máximo para águas de consumo humano, enquanto a Organização Mundial da Saúde recomenda um limite de potabilidade para o boro de 0,3ppm.

#### Água Superficial – Lago

- Padrões de qualidade ambientais de águas segundo classificação do Decreto 8468 (1976) Artigo 7º incluindo:
  - Em âmbito estadual: Decreto 8.468 (8 setembro de 1976) – Artigo 13º considerando que o lago contribua para a rede hidrográfica do Paraíba do Sul, tida pela CETESB como Classe 4.
  - Em âmbito Federal: CONAMA 20 (1986). Estes padrões foram referidos somente para os parâmetros não abordados pela legislação estadual.
- Padrão de emissão de efluentes tratados em corpos de água (considerando as descargas de efluentes para o lago, como especificado no Artigo 9º do mesmo decreto) – Decreto Estadual 8.468 (8 de setembro de 1976), Artigo 18º.

Dentre os padrões acima, o limite de boro para águas enquadradas na Classe II é de 0,75mg/L, segundo Resolução CONAMA 20 (1986) e de 5,0mg/L, segundo Decreto Estadual 8468 (1976). O limite padrão do boro para lançamento de efluentes em corpos de água e em sistemas de esgotos com tratamento (Decreto 8468, 1976) é igual a 5mg/L.

## **4.ÁREA DE ESTUDO**

### **4.1. LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO**

O local escolhido para o desenvolvimento do projeto situa-se no município de Taubaté, que se encontra na região do Médio Vale do Rio Paraíba, entre a Serra da Mantiqueira e a Serra do Mar, região leste do Estado de São Paulo. A cidade dista 120km da capital e o acesso à área pode ser feito através das rodovias Presidente Dutra (BR-116), ou pela Rodovia Ayrton Senna / Carvalho Pinto (SP-070) (Figura 4.1). A área específica onde o estudo foi realizado encontra-se no Distrito Industrial do município e ocupa uma área total de 1.040.004,50m<sup>2</sup>. A localização exata da área não será discriminada devido à solicitação de sigilo pelos responsáveis da indústria.

### **4.2. ASPECTOS SOCIO-ECONÔMICOS**

O município de Taubaté possui uma população de 244.165 habitantes e se destaca por suas vocações múltiplas nas seguintes atividades econômicas: industrial (73%), comercial (20%), turística (2%) e agropecuária (5%) (IBGE, 2000). Atualmente possui um grande parque industrial; cujas principais atividades são compostas por empresas de capital estrangeiro, incluindo as automobilísticas e de autopeças, eletroeletrônicos, química, equipamentos industriais, máquinas e ferramentas, usinagem e caldeiraria, materiais elétricos e de telecomunicações, fundição, artefatos de cimento, plástico e madeira, beneficiamento de argila, cerâmica, água mineral, bebidas e produtos alimentícios. Dentre as atividades agropecuárias destacam-se as culturas de arroz, milho, batata, feijão, cana para forragem e hortifrutigranjeiros. Taubaté também desenvolveu seu potencial pecuário, tornando-se uma grande bacia leiteira, onde predominam as raças holandesas e gir holandesa.

O município é dotado de abastecimento de água tratada e possui captação de esgoto, iluminação pública, escoamento para águas pluviais, pavimentação e energia elétrica em 98% da área urbana.

Segundo o *Relatório de qualidade das águas subterrâneas do Estado de São Paulo* (CETESB, 1998), o Município de Taubaté tem um índice 0 de utilização de água subterrânea para abastecimento público. No entanto, algumas residências possuem poços cacimba particulares para o consumo doméstico e algumas indústrias possuem poços tubulares profundos para usos sanitário e industrial.

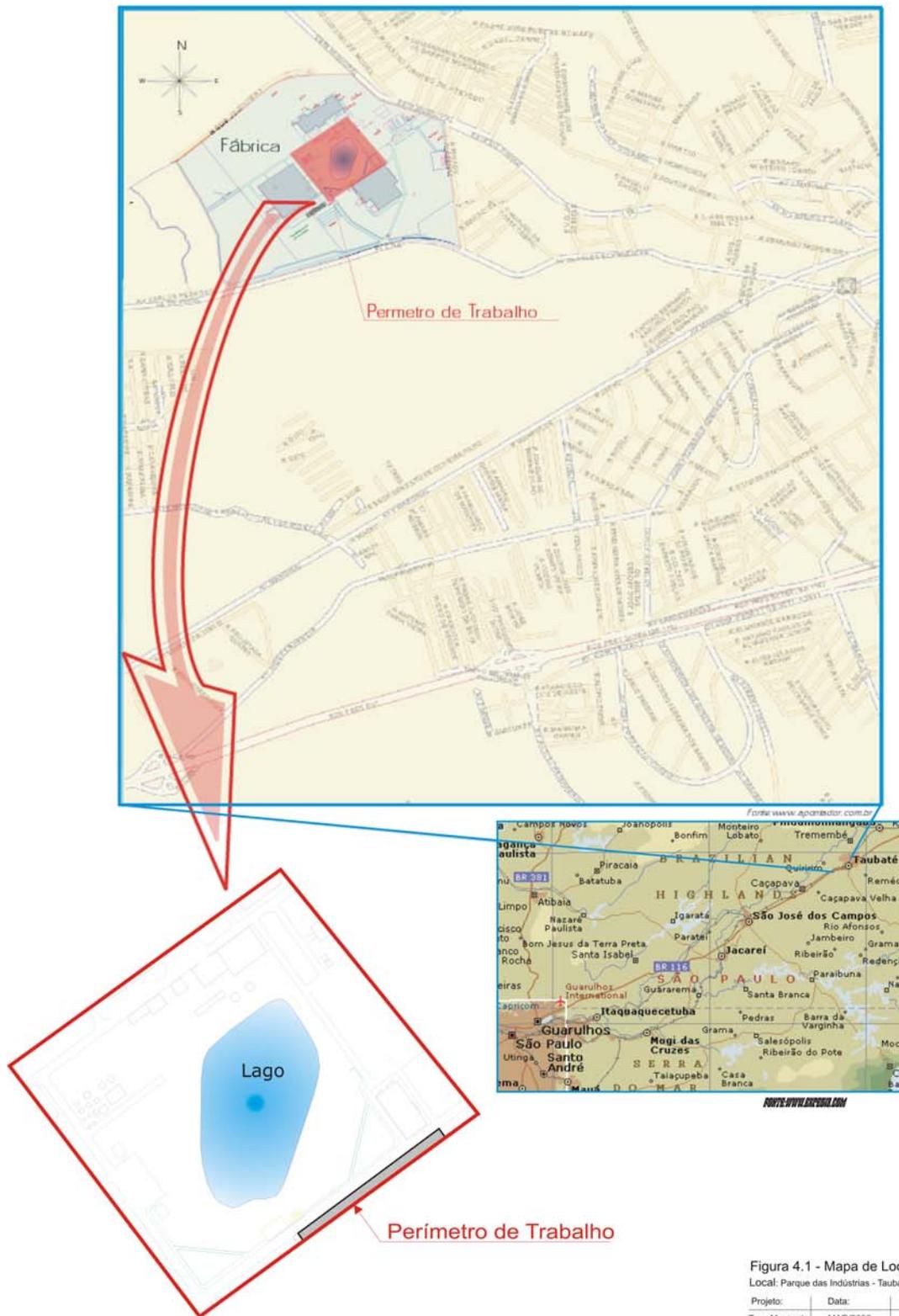


Figura 4.1 - Mapa de Localização.  
Local: Parque das Indústrias - Taubaté.

Projeto:	Data:	Escala:	Desenho:
Tese Mestrado	MAR/2006	Sem Escala	Tavares, T.

Figura 4.1: Localização da área de estudo.

### **4.3. HISTÓRICO DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO**

O zoneamento da área industrial onde as atividades do presente trabalho foram realizadas é, segundo a Regional CETESB – Taubaté, Corredor Atacadista (CB3) conforme Certidão de Uso do Solo de 10/12/2001.

Segundo IBGE, o código da atividade desenvolvida no local é 143310-5. Atualmente a fábrica está em funcionamento, abrigando atividades industriais desde 1967 aos dias atuais.

Segundo informações de funcionários antigos da empresa, o histórico da área é o seguinte:

- Data desconhecida a 1958 – área ocupada por uma empresa cuja atividade principal era Fundição de Ferro e Produtos Especiais.
- 1958 – início das atividades de produção de cubos e tambores de freio e usinagem de discos por outra empresa.
- 1967 – início das operações por outra empresa envolvendo fundições de alumínio e ferro e produção de componentes automotivos.

### **4.4. ASPECTOS FISIAGRÁFICOS**

De acordo com ROSS & MOROZ (1997), o município de Taubaté localiza-se na unidade morfo-estrutural da Bacia Sedimentar de Taubaté de idade cenozóica, constituída por arenitos, folhelhos e argilitos, com solo predominante do tipo Latossolo Vermelho-amarelo. A unidade geomorfológica específica é denominada de Depressão do Médio Paraíba, localizada na porção leste do Estado de São Paulo, entre o Planalto e Serra da Mantiqueira ao sul, o Planalto de Paraitinga/Paraibuna a norte e o Planalto do Médio Vale do Paraíba a leste e a oeste. Esta unidade é caracterizada por formas de relevo denudacionais, constituindo-se basicamente por colinas de topos convexos. As altimetrias predominantes são de 600m a 700m, e as vertentes apresentam declividades entre 5 e 20%. A drenagem apresenta um padrão dendrítico, com o vale principal adaptado às direções das estruturas geológicas regionais e os vales apresentam entalhamentos variando entre 20 e 80m.

De acordo com o mapa topográfico, escala 1:10.000 (IGC, 1978), a elevação da área é de aproximadamente 572m acima do nível do mar. Localizada na bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (UGRHI-02), com drenagem direcionada para o corpo receptor Córrego José Raimundo, classificado pelo Decreto Estadual nº 8.468 de 1976 como Classe IV.

Segundo DAEE (1977), o clima da região do Vale do Paraíba e Litoral do estado tem comportamento subtropical quente, com verões chuvosos e invernos secos, temperatura média anual acima de 21°C e umidade relativa média maior que 70%. A precipitação média anual na bacia oscila entre 1.200 e 2.500mm, tendo como fator determinante em seu regime a configuração topográfica. A maior área da região corresponde aos vales, onde a precipitação é

bem menor, variando entre 1.200 e 1.600mm. A evaporação potencial média anual é da ordem de 1.700mm, sendo a evaporação real média em torno de 750mm.

#### **4.4.1. Geologia**

A região localiza-se na Província Mantiqueira de ALMEIDA *et al.* (1977) e HASUI (1982). Nela se destacam duas grandes unidades geológicas: o embasamento cristalino e a Bacia de Taubaté. A área encontra-se sobre sedimentos terciários que preenchem a Bacia Sedimentar de Taubaté, com espessura de até 200m, segundo o mapa de isópacas do DAEE (1977). A Bacia de Taubaté está inteiramente no complexo cristalino pré-cambriano do leste paulista, no bloco tectônico Paraíba do Sul de HASUI *et al.* (1978).

Geotectonicamente, a bacia sedimentar do Rio Paraíba do Sul, insere-se no contexto do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil, uma feição alongada e deprimida, de direção ENE / WSW, desenvolvida entre os estados do Paraná e Rio de Janeiro numa extensão de pelo menos 800km, de idade cenozóica, com eixo principal orientado de nordeste a sudoeste (RICCOMINI, 1989).

O pacote sedimentar se sobrepõe discordantemente ao embasamento cristalino composto, essencialmente por rochas gnáissicas para ou ortoderivadas, por vezes migmatizadas e intrudidas por rochas granitóides mais jovens. Os principais domínios litológicos em contato com as faces norte e sul da bacia de Taubaté são os Complexos Paraíba do Sul e Embu respectivamente (IPT, 1990). O Complexo Paraíba do Sul agrupa rochas predominantemente gnáissicas e migmatíticas bastante deformadas, enquanto o Complexo Embu possui rochas metamórficas de médio a alto grau, compostas por xistos diversos associados a gnaisses e migmatitos, ocorrendo subordinadamente corpos de anfibolitos.

Quanto à coluna litoestratigráfica da bacia, FRANGIPANI & PANNUTI (1965) citam e concordaram com ALMEIDA (1952), TRICARD e SILVA (1958), e Ab'SABER (1950) sobre a existência de dois pacotes sedimentares, sendo a formação inferior constituída de folhelhos laminados e pirobetuminosos contendo crustáceos e restos de peixes denominada de Formação Tremembé e a formação superior constituída por argilas variegadas, areia e cascalho denominada por MEZZALIRA, 1962 (apud FRANGIPANI & PANNUTI, 1965) de Formação São Paulo. Segundo FRANGIPANI & PANNUTI (1965), o pacote inferior é constituído por sedimentos arenosos e argilosos de origem lacustre, esverdeados, enquanto o pacote superior é constituído por camadas lenticulares de argilas, silte, areia e cascalho de origem flúvio-lacustre, sendo este último correlacionável com as camadas da Bacia Sedimentar de São Paulo. Após essa divisão inicial, HASUI & PONÇANO (1978) classificaram o pacote sedimentar também em duas porções; a inferior lacustrina, denominada de Formação Tremembé

(ALMEIDA, 1955, apud DAEE, 1977) e o pacote superior, eminentemente fluvial, designado por CARNEIRO *et al.* (1976), como Formação Caçapava.

Segundo IPT (1981), a Bacia de Taubaté é subdividida da base para o topo em três formações pertencentes ao Grupo Taubaté (Figura 4.2):

Formação Resende: caracterizada por depósitos de sistemas de leques aluviais, incluindo arenitos e conglomerados de matriz areno-argilosa.

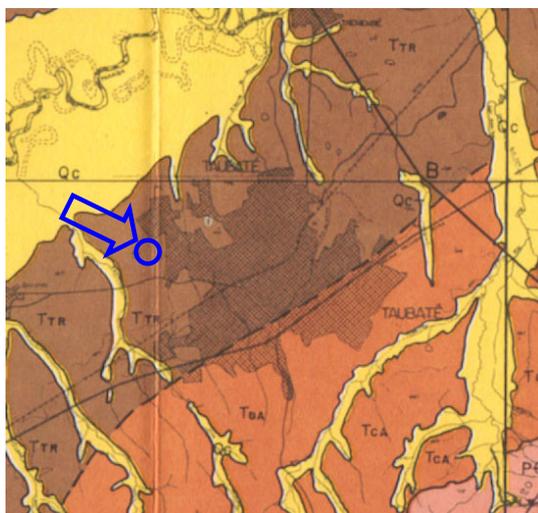
Formação Tremembé: correspondente a um sistema deposicional lacustre, com ocorrência de folhelhos, intercalações de areias finas e brechas sedimentares, bem como bolsões de argila.

Formação Caçapava: constituída por sedimentos de origem fluvial meandrante, contendo termos arenosos e siltosos com intercalações argilosas podendo ser observados conglomerados com grãos de quartzo de baixo grau de arredondamento.

Cabe ainda ressaltar a presença dos Depósitos Quaternários, que tem origem aluvionar, e os sedimentos encontram-se encaixados nos vales dos rios.

Os municípios de Taubaté e Tremembé encontram-se na porção central da bacia, onde os sedimentos são pertencentes à fácies predominantemente lacustrina, sendo constituída por argilas verdes, maciças, de espessura métrica, com associações ou intercalações de calcários dolomíticos e ritmitos formados por folhelhos e margas, e de arenitos grossos, conglomeráticos, com espessura decimétrica a métrica (DAEE, 1977).

Na área urbana de Taubaté afloram os folhelhos cinzas da Formação Tremembé (fácies lacustre), unidade inferior do pacote sedimentar, enquanto que na área do aterro sanitário da cidade, situado a NE do núcleo urbano, afloram os sedimentos fluviais argilo-arenosos da Formação Caçapava (IPT, 1978).



LEGENDA:

- Qc** Sedimentos Continentais: aluviões, coluviões e depósitos de tálus.
- Tca** Grupo Taubaté - Formação Caçapava: sedimentos fluviais.
- Ttr** Grupo Taubaté - Formação Tremembé: sedimentos lacustrinos.
- Pcm** Embasamento Cristalino – Rochas Migmatíticas.

Figura 4.2: Mapa geológico regional. Fonte: Mapa Geológico do Estado de São Paulo – Região Administrativa 03 e Região Administrativa 02 (Parcial) - IPT (1978). Escala original: 1:200.000.

RICOMINI (1989) propôs uma nova classificação litoestratigráfica para o “*Rift Continental do Sudeste do Brasil*”, cuja divisão engloba as formações Resende, Tremembé e São Paulo, representando respectivamente os sistemas de leques aluviais, lacustrinos e de rios meandantes, dentro do Grupo Taubaté; Formação Pindamonhangaba que engloba os sedimentos do sistema fluvial meandrante, sobreposta em discordância erosiva às formações inferiores, sendo o pacote coberto por depósitos colúvio-aluvionares e baixos terraços do atual Rio Paraíba do Sul.

IPT (1990) classificou as formações existentes na bacia da base para o topo em quatro seqüências distintas:

Seqüência Tremembé (EOltr): engloba sedimentos lacustres e fluviais meandantes na base da bacia. O sistema fluvial meandrante é composto por argilitos e arenitos e secundariamente por linhitos e folhelhos pirobetuminosos. O sistema lacustre é composto principalmente por argilitos maciços, folhelhos laminados, calcários e ritmitos.

Seqüência Taubaté (OStbL): sedimentos da porção inferior pertencentes ao sistema deposicional lacustre que ocorre principalmente nas porções mais baixas do relevo, ocupando as margens do Rio Paraíba do Sul e de seus afluentes. Ocorre nas margens dos córregos próximos a área fabril. Tal unidade é predominantemente composta por argilitos maciços esverdeados e por vezes folhelhos laminados na porção central da bacia.

Seqüência Pindamonhangaba (Mp): tal seqüência é dividida da base para o topo em sistema de leques aluviais composto por diamictitos e arenitos grossos, sistema fluvial meandrante composto por argilitos e arenitos e sistema fluvial entrelaçado, composto por arenitos. A região que engloba a área de estudo é predominantemente composta pelos sedimentos do sistema fluvial meandrante sobrepostos em contato discordante aos argilitos e folhelhos do sistema lacustre da Seqüência Taubaté. O sistema fluvial meandrante da Seqüência Pindamonhangaba corresponde à Formação Pindamonhangaba de RICCOMONI (1989). Análises de difratometria de raios X realizadas em argilas superiores revelaram a predominância dos argilominerais do grupo das caulinitas.

Seqüência Vale do Paraíba (RvpFM): engloba os sedimentos do atual sistema deposicional fluvial do Rio Paraíba do Sul e seus tributários, bem como os seus baixos terraços a eles associados. Os aluviões mais expressivos encontram-se expostos nas folhas Pindamonhangaba e Taubaté, sendo compostos predominantemente por turfas, argilas maciças e arenitos grossos a finos e micáceos.

#### **4.4.2. Hidrogeologia**

Na Bacia de Taubaté, a água subterrânea acumula-se primeiramente nos sedimentos fluviais quaternários ao longo das principais redes de drenagem e nos sedimentos terciários da Bacia de Taubaté. O aquífero Taubaté, formado pelas rochas sedimentares terciárias do Grupo Taubaté é o mais intensamente explorado, caracterizado por sua porosidade primária, sendo do tipo livre a semi-confinado e bastante heterogêneo. O aquífero Cristalino, composto pelas rochas do embasamento cristalino, tem sua produtividade associada ao fraturamento da rocha (porosidade secundária) e ao manto de intemperismo, sendo também um aquífero regional, confinado e bastante heterogêneo. No entanto, na região do Vale do Paraíba é pouco explorado devido à sua baixa produtividade se comparada com a do aquífero sedimentar terciário.

A espessura total do aquífero Taubaté varia entre 200 e 500m no eixo da bacia, afinando-se para as suas margens rumo ao centro-noroeste, onde as camadas arenosas desaparecem em contatos interdigitados com os folhelhos e argilitos da região de Taubaté e Pindamonhangaba.

As características hidrogeológicas do aquífero sedimentar estão diretamente relacionadas com os ambientes de deposição da Bacia de Taubaté, onde se distinguem duas unidades com diferentes comportamentos hidráulicos: a primeira associada ao ambiente fluvial, aflorante nas porções sudeste e noroeste da bacia, com altas vazões de exploração em média de 40m<sup>3</sup>/h, chegando a 200m<sup>3</sup>/h e transmissividades médias de 100m<sup>3</sup>/dia e a segunda unidade está associada ao sistema lacustre, situada na porção central da bacia entre Taubaté e

Pindamonhangaba, apresentando vazões relativamente menores, com médias de 20 a 30m<sup>3</sup>/h e transmissividades variando entre 10 e 20m<sup>3</sup>/dia (AGUIAR *et al.*, 1985, apud DAEE, 1977).

Regionalmente a recarga do aquífero se dá em toda a sua porção não impermeabilizada e a área de descarga está associada ao Rio Paraíba do Sul, que representa o nível de base regional, com fluxo efluente em relação ao aquífero. As curvas equipotenciais acompanham a topografia, descendo de ambas as serras para o centro do vale. O rio Paraíba do Sul representa a zona de descarga regional do aquífero. enquanto os seus afluentes comportam-se como zonas de descarga locais.

Localmente, na área industrial, a recarga do aquífero está associada às áreas não impermeabilizadas, bem como pela própria lagoa na porção central da fábrica, que se comporta de forma influente em relação ao aquífero. As áreas de descarga compõem-se principalmente por dois córregos, um a leste e outro a oeste da fábrica, considerados como as zonas de descarga locais.

## 5.MATERIAIS E MÉTODOS

As etapas de trabalho realizadas para o cumprimento e desenvolvimento do presente estudo incluem:

### 5.1. EXECUÇÃO DE SONDAGENS E AMOSTRAGEM DE SOLO

Foram executadas 41 sondagens de solo com profundidades variando entre 1,5 e 15,0m no perímetro marginal do lago (Figura 5.1). Desse universo de sondagens foram coletadas 20 amostras de solo para análise de boro. As sondagens foram realizadas para investigação do substrato, coleta de amostras de solo e posterior instalação de poços de monitoramento para o mapeamento da pluma; bem como a instalação de piezômetros (S-20 (PZ-01), S-45 (PZ-02) e S-46 (PZ-03), PZ-04 e PZ-05), para definição da relação hidráulica entre o lago e o aquífero.

Os principais critérios de locação dessas sondagens foram:

- Os resultados químicos dos estudos anteriores, com o objetivo de mapear em área as plumas de contaminação, com base em uma locação direcionada (CETESB, 2001).
- A direção preferencial do fluxo subterrâneo, obtida nos estudos anteriores.
- Disponibilidade de espaço físico no local para desenvolvimento dos trabalhos.

As sondagens (S-15 a S-48), os poços de monitoramento (PM-08 a PM-20) e os piezômetros (PZ-01 a PZ-05) foram executados pela equipe ALMEIDASONDAS, utilizando-se trado manual de 4", acoplado a sistema de haste e tripé. Para a execução das sondagens, quando pertinente, o piso industrial foi atravessado com martetele elétrico, utilizando-se gerador de energia elétrica.

Os dois poços profundos (PM-01P e PM-10P) foram instalados em outra etapa de campo pela equipe de sondagem AMERICAN DRILLING, através do sistema de perfuração *Hollow Stem Auger*, que consiste em um trado oco helicoidal mecanizado acoplado a um caminhão, com diâmetro externo de perfuração de 8" e interno de 4".

As amostragens do solo foram efetuadas segundo a técnica *Direct Push*, que consiste na cravação por impacto de amostrador *Geoprobe* manual. O amostrador é revestido internamente com uma camisa plástica de PVC transparente (*liner*) removível e descartável de 1<sup>1/2</sup>" x 60cm. Este proporciona melhor acondicionamento e preservação das características do solo coletado, permitindo a visualização das características da amostra. A descrição litológica das sondagens encontra-se nas fichas de campo (Anexo I).

Após a amostragem, os *liners* foram devidamente identificados (IDs), com a indicação do topo e base do horizonte amostrado. Parte do solo coletado nos *liners* foi utilizada para descrição litológica e organoléptica (cor, odor e presença de resíduo), que por sua vez, foram

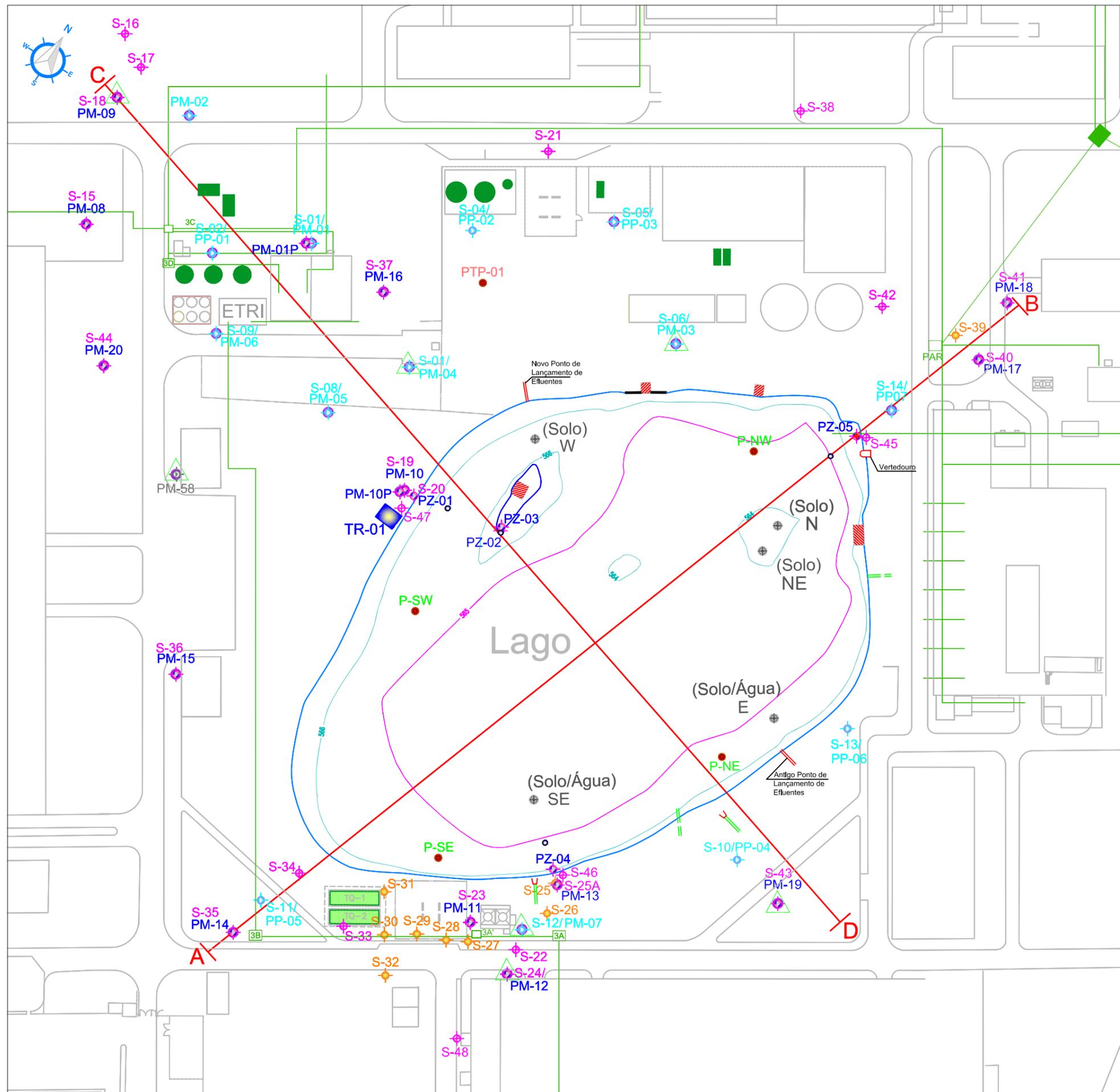
os critérios utilizados para selecionar a amostra mais indicada do perfil para realização de análises químicas.

Todas as amostras de solo foram coletadas diretamente dos *liners* para os frascos fornecidos pelo laboratório, sendo os frascos acondicionados e conservados a temperatura em torno de 4°C, em caixa térmica com gelo, até a entrega no laboratório. A relação das sondagens, as amostras de solo selecionadas para análise e suas características, bem como as análises realizadas são apresentadas no Anexo II.

Os equipamentos de perfuração foram descontaminados entre cada sondagem executada, bem como os amostradores entre cada intervalo amostrado, seguindo os procedimentos descritos abaixo:

- Remoção do solo residual de perfuração com água potável;
- Limpeza dos equipamentos e amostradores com detergente neutro (tipo Alconox);
- Enxágüe dos equipamentos e amostradores com água potável;
- Enxágüe dos equipamentos e amostradores posteriormente com água destilada.

O material geológico atravessado foi descrito a cada 1,0m ou quando havia mudanças nas características litológicas/organolépticas (constituição, granulometria, cor, odor e presença de resíduo).



LEGENDA:

- REDE SUBTERRÂNEA DE EFLUENTE INDUSTRIAL E POÇOS DE ÁGUA RESIDUÁRIA (PAR)
- TANQUES AÉREOS DE COMBUSTÍVEL E/OU ÓLEO
- TANQUES DE COMBUSTÍVEL E/OU ÓLEO
- CAVAS DE REMOÇÃO DE TANQUES SUBTERRÂNEOS
- PONTOS DE LANÇAMENTO DE EFLUENTE
- POÇO TUBULAR PROFUNDO
- POÇO DE MONITORAMENTO (Outros, 2003)
- SONDAGEM E POÇO DE MONITORAMENTO (Outros, 2003)
- SONDAGEM SEM AMOSTRAGEM DE SOLO (2004)
- SONDAGEM COM AMOSTRAGEM DE SOLO (2004)
- POÇO DE MONITORAMENTO (2004)
- SONDAGEM COM AMOSTRAGEM DE SOLO E ÁGUA SUBTERRÂNEA (2004)
- PIEZÔMETROS (2004)
- PONTOS DE AMOSTRAGEM DE SOLO/SEDIMENTO DO LAGO (Outros, 2003)
- PONTOS DE AMOSTRAGEM DE ÁGUA, SOLO E SEDIMENTOS DO LAGO (2004 / 2005)
- MARCOS TOPOGRÁFICOS - NÍVEL DO LAGO
- TRINCHEIRA PARA AMOSTRAGEM INDEFORMADA DE SOLO
- AMOSTRAGEM DE ÁGUA SUBTERRÂNEA
- ENSAIO DE PERMEABILIDADE - "SLUG TEST"
- SEÇÃO GEOLÓGICA



FIGURA 5.1: Mapa de Atividades Atuais

Local Parque das Indústrias Taubaté , Brasil

Projeto Tese de Mestrado

## 5.2. AMOSTRAGEM INDEFORMADA DE SOLO

Com o intuito de estabelecer as características físicas da unidade aquífera predominante na área do lago, uma amostra indeformada representativa do solo foi coletada e utilizada para análises físicas, incluindo porosidade total, porosidade efetiva e condutividade hidráulica vertical. O uso dos resultados dos ensaios foi feito de maneira qualitativa, servindo apenas para nortear os parâmetros inseridos no modelo matemático, pois uma única amostra pontual é insuficiente para a representatividade do aquífero.

Para a determinação dos parâmetros físicos do solo da área em estudo foi realizada uma amostragem de solo com coleta de uma amostra indeformada (AI-01) e outra, deformada (AD-01).

O equipamento utilizado para este tipo de coleta trata-se de um Trado para Amostras Indeformadas, conhecido como amostrador tipo *Uhland*. A amostra indeformada é retirada em cilindros de aço inoxidável, com 50mm de diâmetro, 51mm de altura e volume de 100cm<sup>3</sup>.

A coleta foi executada em uma trincheira (TR-01) de 1,0m<sup>2</sup> e 0,6m de profundidade na margem oeste do lago, a aproximadamente 2,0m do poço PM-10 (Figura 5.1). A amostra indeformada foi coletada com o amostrador descrito anteriormente na profundidade de 0,60m, onde se observou um litotipo similar ao predominante na área de estudo, enquanto a amostra deformada foi coletada com pá e acondicionada em saco hermético, na mesma profundidade.

Os ensaios de granulometria, densidade de partículas, densidade do solo, umidade natural, retenção de umidade no solo, porosidade total, porosidade efetiva e condutividade hidráulica saturada foram realizados no Laboratório de Física dos Solos e Irrigação/AGAMA/DIGEO do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).

## 5.3. AMOSTRAGEM DE SOLO E SEDIMENTO DO LAGO

Além das amostragens realizadas durante as sondagens na área do entorno do lago em junho de 2004, realizaram-se amostragens de solo e sedimento de fundo dentro do lago em cinco pontos distintos (Figura 5.1), a saber:

- em dois dos pontos mais profundos do lago levantados através de batimetria, com respectivas profundidades de 2,5m (Lago N) e 2,0m (Lago NE), onde houve um descarte de óleo solúvel através da galeria de águas pluviais. As amostras de sedimento foram identificadas por Sed N e Sed NE, enquanto as amostras de solo subjacente foram denominadas S Sub N e S Sub NE, respectivamente.
- no local de entrada dos efluentes no lago (Lago E), onde poderia haver um acúmulo de compostos presentes nos efluentes. As amostras foram denominadas de Sed E e S Sub E.

- em um ponto próximo à ETRI (Lago W), onde um extravasamento nas piscinas de armazenamento de borra oleosa localizadas na ETRI alcançou essa porção do lago. As amostras foram denominadas de Sed W e S Sub W.
- no local próximo ao Poço de Água Residuária (PAR 3A), possível fonte de impacto na porção SE do lago (Lago SE). As amostras foram denominadas de Sed SE e S Sub SE.

Nas campanhas seguintes de amostragem (março/abril e outubro de 2005), os pontos denominados de Lago NE e Lago E não foram amostrados.

As amostras foram coletadas através da técnica *Direct Push*, que consiste na cravação por impacto de amostrador *Geoprobe* manual, revestido internamente com uma camisa plástica de PVC transparente (*liner*) removível e descartável de 1.1/2" x 60cm. Dessa forma obteve-se o sedimento de fundo do lago e o solo sotoposto a este.

Todas as amostras de solo e de sedimento foram coletadas diretamente dos *liners* para os frascos fornecidos pelo laboratório, sendo os frascos acondicionados e conservados a temperatura de 4°C em caixa térmica com gelo até a entrega no laboratório.

A Tabela 5.1 descreve as campanhas de amostragem de solo, sedimento de fundo e solo subjacente, a relação das amostras e suas características, bem como as análises realizadas.

A Tabela 5.2 mostra as análises, a metodologia de análise e o laboratório utilizado.

Para o tratamento de dados, utilizaram-se também dados da primeira campanha de monitoramento, realizada na fábrica por uma outra empresa, em julho de 2003, em quatro pontos (Figura 5.1), a saber:

- P-NW, localizado na porção norte do lago, próximo ao lançamento de águas pluviais;
- P-NE, localizado na porção leste do lago, próximo ao antigo lançamento de efluentes tratados;
- P-SE, localizado na porção sul do lago, e
- P-SW, localizado na porção oeste do lago.

Tabela 5.1 – Campanhas de amostragens de solo, sedimento de fundo e solo subjacente do lago.

Localização	Sondagens (profundidade)	Profundidade de amostragem com liner(m)	ID das amostras de solo (intervalo amostrado-m)	Data de amostragem	Odor químico (OQ)	Observações	Parâmetros analisados
Porção norte do lago (porção mais profunda)	Lago N (4,10m)	3,5 – 3,9	Sed N (3,5 – 3,9)	27/03/05	OMO	---x---	Análise Granulométrica / DRX / CTC / M.O. / pH / B
		3,9 – 4,1	S Sub N (3,9 – 4,1)		OMO		
Porção sudeste do lago	Lago SE (2,40m)	1,8 – 2,1	Sed SE (1,8 – 2,1)	27/03/05	OMO	---x---	Análise Granulométrica / DRX / CTC / M.O. / pH / B
		2,1 – 2,4	S Sub SE (2,1 – 2,4)		OMO		
Porção oeste do lago	Lago W (2,90m)	2,3 – 2,5	Sed W (2,3 – 2,5)	27/03/05	OMO	---x---	Análise Granulométrica / DRX / CTC / M.O. / pH / B
		2,5 – 2,9	S Sub W (2,5 – 2,9)		OMO		
Porção oeste do lago	Lago N (3,80m)	3,0 – 3,3	Sed N (3,0 – 3,5)	28/10/05	OMO	---x---	Análise Granulométrica / DRX / CTC / M.O. / pH / B
		3,6 – 3,8	S Sub N (3,5 – 3,8)		OMO		
Porção oeste do lago	Lago SE (2,10m)	1,2 – 1,5	Sed SE (1,2 – 1,5)	28/10/05	OMO	---x---	Análise Granulométrica / DRX / CTC / M.O. / pH / B
		1,5 – 1,9	S Sub SE (1,5 – 1,9)		OMO		
Porção oeste do lago	Lago W (2,10m)	1,4 – 1,7	Sed W (1,4 – 1,7)	28/10/05	OMO	---x---	Análise Granulométrica / DRX / CTC / M.O. / pH / B
		1,7 – 2,1	S Sub W (1,7 – 2,1)		OMO		
Próxima ao PZ-05, na margem N do lago	S-45 (2,8m)	1,2 – 1,4*	S-45 (1,7 – 1,9)	01/04/05	LOQ	---x---	Análise Granulométrica / DRX / CTC / M.O. / pH / B
		1,4 – 1,5*			LOQ		
		1,5 – 1,7*			OQ		
		1,7 – 1,9*	OMO				
		1,9 – 2,1*	OMO	28/10/05			
		2,1 – 2,5*	S-45 (1,7 – 1,9)		OMO		
2,5 – 2,8*		OMO					
Próxima ao PM-13, na margem SE do lago	S-46 (3,5m)	1,8 – 2,2*	S-46 (1,8 – 2,2m)	01/04/05	SOQ	---x---	Análise Granulométrica / DRX / CTC / M.O. / pH / B
		2,5 – 3,0*	S-46 (1,8 – 2,2m)	28/10/05	OMO		
		3,0 – 3,4*		OMO	Presença de matéria orgânica (M.O.)		
Próxima ao PM-10, na margem W do lago	S-47 (3,9m)	1,1 – 1,5*	S-47 (1,1 – 1,5m)	31/03/05	SOQ	---x---	Análise Granulométrica / DRX / CTC / M.O. / pH / B
		1,5 – 1,8*			SOQ		
		1,8 – 1,9*			SOQ		
		3,2 – 3,4*	S-47 (3,4 – 3,5m)	28/10/05	OMO		
		3,4 – 3,5*			OMO		
		3,5 – 3,7*			OMO		
		3,7 – 3,9*			OMO		

\*OMO - odor de matéria orgânica; LOQ - leve odor químico; SOQ - sem odor químico; DRX - difração de raio X; CTC - capacidade de troca catiônica, M.O. - matéria orgânica; B - boro.

Tabela 5.2 – Análises realizadas em amostras deformadas de solo.

Análise	Método	Laboratório
Granulometria	Peneiramento e pipetagem (SUGUIO, 1973)	DGSA/IGc/USP
Mineralogia	Difração de raio X	LCT/EP/PMI/USP
Química (B)	USEPA 3050B / USEPA 6010B (ICP-AES)	Bioagri Ambiental Ltda.
Capacidade de Troca Catiônica (CTC), pH, teor de matéria orgânica, B extraível, análise granulométrica	Vários	LAGRO – Campinas - SP

### 5.3.1. Análises Granulométricas

Dentre as 18 amostras de solo/sedimento, 17 foram pelo método de peneiramento e pipetagem (SUGUIO, 1973), que consiste em peneirar faixas granulométricas maiores que silte grosso (0,062 - 0,031mm de diâmetro), após a pipetagem das frações granulométricas menores (argila e silte fino). Neste ensaio utiliza-se a pipeta de Robinson, considerando o tempo padrão de sedimentação segundo a Lei de Stokes. Os resultados apresentados no item 6.3.2.1 consideram as seguintes faixas granulométricas segundo a escala de Wentworth: grânulo (2,83-2,00mm), areia muito grossa (2,00-1,00mm), areia grossa (1,00-0,50mm), areia média (0,50-0,25mm), areia fina (0,25 – 0,125mm), areia muito fina (0,125-0,062mm), silte grosso a muito fino (0,062-0,004mm) e argila (<0,004mm).

Para essas amostras utilizou-se a classificação de SHEPPARD (1954) para solo e para sedimento de fundo (Figura 5.2).

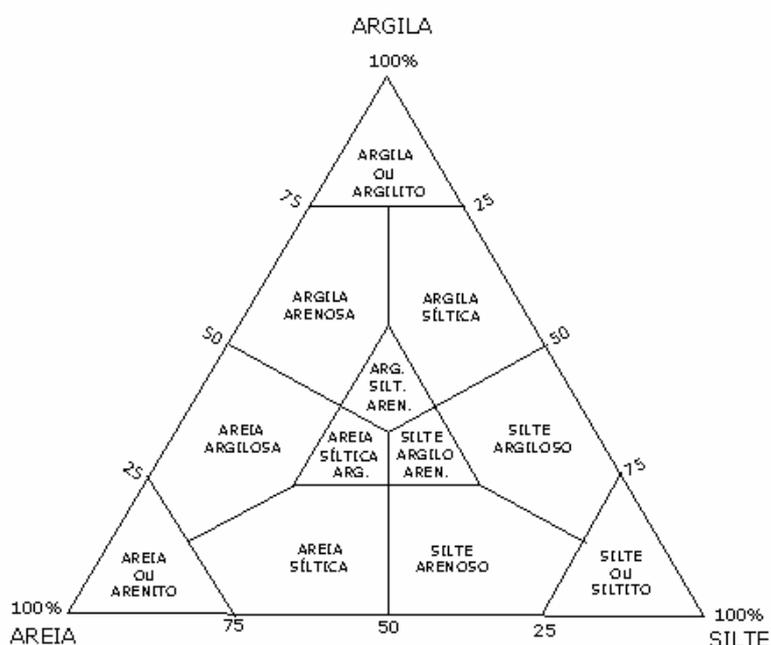


Figura 5.2: Diagrama de SHEPPARD (1954) de classes texturais.

A amostra restante (Sed W -2,3-2,5m) foi analisada para granulometria no Laboratório agrônômico LAGRO pelo método de dispersão total e pipetagem (EMBRAPA, 1979).

### **5.3.2. Análises Mineralógicas**

Para o reconhecimento de sua mineralogia básica, as 18 amostras de solo/sedimento foram analisadas em suas frações totais (<200mesh) *in natura* por difração de raio X (DRX), após quarteamento e moagem em panela de carbetto de tungstênio. O difratômetro utilizado foi o modelo MPD 1880 da Philips, do Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) do Departamento de Minas e Engenharia do Petróleo da USP, contendo tubos de raio X de cobre, operando com radiação de 40kV e 40mA, varredura de  $2\theta$ , entre 2,5 e  $70^\circ$ , passo de  $0,02^\circ$  num tempo de 1s.

A identificação dos minerais foi realizada através do *software* EVA Application, versão 7,0,0,1 (1996-2001) e a biblioteca de identificação *Powder Diffraction File* (PDF) *Maintex Library*, versão 7.0.108, *data sets* 1-51 *plus* 70-89, disponível no DMG – IGc – USP.

### **5.3.3. Análises Químicas**

As análises químicas para detecção do boro foram realizadas em amostras totais de solo/sedimento pela metodologia USEPA 6010B, através do ICP-AES (*Inductively Coupled Plasma – Atomic Emission Spectrometry*) pelo laboratório Bioagri Ambiental. Os limites de detecção para o boro nas diversas campanhas estão demonstrados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Limites de detecção das análises químicas para boro.

Parâmetro	Campanha	Límite de detecção (mg/kg)
B	julho de 2003	13
	julho de 2004	0,5
	março de 2005	0,5
	outubro de 2005	0,5

### **5.3.4. CTC, pH do Solo e Teor de Matéria Orgânica**

Análises químicas para determinação do parâmetro CTC (Capacidade de Troca Catiônica), pH em H<sub>2</sub>O e em solução de CaCl<sub>2</sub>, teor de matéria orgânica (M.O.) e boro extraível foram efetuadas nas 18 amostras de solo e sedimento de fundo. Esse conjunto de análises é conhecido como “Análises químicas para fins de fertilidade”. Inicialmente, as amostras foram secas a 60°C, desagregadas e quarteadas. O teor de matéria orgânica (M.O.) foi obtido através do método de colorimetria (RAIJ *et al*, 1987), as análises de pH em H<sub>2</sub>O e em solução de CaCl<sub>2</sub> foram realizadas segundo metodologia descrita em RAIJ *et al* (1987), enquanto que o resultado da análise de CTC é a somatória das concentrações dos principais cátions trocáveis (K, Ca, Mg,

Al e H). O Al trocável foi analisado pelo método do KCl segundo EMBRAPA (1979), o Ca e o Mg pelo método do EDTA (RAIJ *et al*, 1987) e o K por fotometria de chama (RAIJ *et al*, 1987). A somatória do H<sup>+</sup> e Al (acidez potencial) foi determinada através de uma solução tampão SMP (RAIJ *et al*, 1987), da qual subtraiu-se o resultado de Al obtido pelo método do KCl, resultando nas concentrações de H<sup>+</sup>. O boro extraível foi obtido através do extrator Mehlich, que utiliza uma solução ácida de HCl e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, e determinação por colorimetria-azometria (RAIJ *et al*, 1987).

#### **5.4. INSTALAÇÃO DE POÇOS DE MONITORAMENTO**

Foram instalados 13 poços de monitoramento (PM) no entorno do lago, com locação estratégica para o mapeamento do limite da pluma de boro em área no aquífero superficial e dois poços profundos (PMP) para avaliação da concentração do boro em profundidade; cinco piezômetros (PZ) dentro do lago para verificação da relação hidráulica entre o lago e o aquífero, sendo dois deles perfurados em diferentes profundidades. A localização dos poços pode ser observada na Figura 5.1.

Os PMs tiveram profundidades variando entre 3,5m e 9,0m, sendo os próximos ao lago mais rasos e os mais profundos no setor NW da área em estudo, enquanto os PMPs foram instalados com profundidades entre 10 e 15m, seguindo as mesmas diretrizes dos poços de monitoramento rasos, com exceção da seção filtrante, que nesse caso foi utilizada com 1m de espessura, para analisar a água subterrânea em profundidade. Os perfis técnico-construtivos desses poços de monitoramento encontram-se no Anexo I. A Tabela 5.4 apresenta as principais características construtivas dos poços, tais como as profundidades totais, seções filtrantes e os níveis de água subterrânea medidos após o desenvolvimento e estabilização.

Os poços de monitoramento de 2” de diâmetro, PM-08 ao PM-20, (em continuidade ao trabalho realizado em 2003) foram instalados seguindo a Norma NBR 13.895 da ABNT (1997), incluindo os seguintes passos:

- perfuração do solo com trado manual de 4” até uma profundidade de pelo menos 2m abaixo do nível de água local;
- revestimento do furo com tubos lisos e filtros geomecânicos de 2” de diâmetro e seção filtrante de 4m em média sendo 2m abaixo do nível de água e 2m acima;
- preenchimento do espaço anelar com pré-filtro tipo pérola até 0,5m acima da seção filtrante;
- colocação de selo de bentonita no espaço anelar, de aproximadamente 0,5m de comprimento;

- preenchimento do espaço anelar restante, com uma mistura de solo e calda de bentonita;
- proteção do revestimento com tampa hermética;
- instalação de câmara de calçada com base de cimento.

Imediatamente após a instalação, cada poço de monitoramento foi desenvolvido sendo extraído de 7 a 10 vezes o volume de água contido em cada poço. Essa atividade normalmente é realizada para remover partículas introduzidas durante a instalação dos mesmos e o sedimento em suspensão presente no fundo dos poços durante a instalação.

Tabela 5.4 – Características construtivas dos poços de monitoramento instalados durante o presente estudo (julho e setembro de 2004).

Poço	Data de instalação	Profundidade total (m)	Cotas das profundidades (manm)	Seção filtrante (m)	Profundidade do nível d'água* estabilizado (m)
PM-01P	27/09/04	14,6	555,0	1,0	6,42 (15/10/04)
PM-08	22/06/04	8,0	561,4	4,0	5,99 (27/07/04)
PM-09	23/06/04	8,0	561,5	4,0	5,43 (27/07/04)
PM-10	23/06/04	4,2	563,2	3,0	1,91 (27/07/04)
PM-10P	28/09/04	10,0	557,6	1,0	3,58 (15/10/04)
PM-11	24/06/04	6,5	563,4	4,0	4,22 (27/07/04)
PM-12	24/06/04	7,2	562,8	4,0	4,51 (27/07/04)
PM-13	24/06/04	3,5	563,6	3,0	1,17 (27/07/04)
PM-14	28/06/04	7,0	562,7	4,0	4,69 (27/07/04)
PM-15	28/06/04	7,0	562,5	4,0	5,20 (27/07/04)
PM-16	29/06/04	7,4	562,0	4,0	5,215 (27/07/04)
PM-17	30/06/04	7,3	562,7	4,0	4,25 (27/07/04)
PM-18	30/06/04	7,0	562,7	4,0	4,25 (27/07/04)
PM-19	01/07/04	7,0	562,7	4,0	4,20 (27/07/04)
PM-20	01/07/04	8,8	560,8	4,0	6,04 (27/07/04)
PZ-01	23/06/04	2,0	564,8	2,0	1,065 (27/07/04)
PZ-02	23/07/04	3,5	562,8	1,0	0,98 (27/07/04)
PZ-03	23/07/04	5,5	560,8	1,0	0,89 (27/07/04)
PZ-04	06/08/04	3,0	563,8	1,0	1,50 (15/10/04)
PZ-05	06/08/04	3,0	563,8	1,0	1,80 (15/10/04)

\* Níveis de água medidos em relação à boca do tubo; manm – metros acima do nível do mar.

#### 5.4.1. Piezômetros

Visando esclarecer a relação hidráulica entre o lago e o aquífero superficial em estudo, foram instalados cinco piezômetros, um na margem oeste do lago (PZ-01), dois em uma área emersa dentro do lago (PZ-02 e PZ-03), um na margem leste do lago (PZ-04) e outro na

margem norte do lago (PZ-05). A localização dos piezômetros pode ser observada na Figura 5.1.

Além disso, foram instaladas barras de ferro, dentro do lago próximo às margens, cujo topo foi objeto do levantamento topográfico para nivelamento. O objetivo desse sistema foi fixar pontos de medição da lâmina de água do lago para inclusão desse nível em toda a atualização de medições de níveis em poços de monitoramento. Esses dados foram sistematicamente integrados para confecção dos mapas potenciométricos.

## **5.5. LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO**

Esta etapa consistiu no levantamento topográfico para locação de todas as atividades executadas no entorno do lago:

- Levantamento dos contornos e da lâmina d'água do lago em toda sua dimensão;
- Levantamento da superfície da base do lago para projetar sua batimetria, visando identificar a porção mais profunda para amostragem de solo e água na lagoa;
- Levantamento das sondagens;
- Levantamento dos poços de monitoramento (rasos e profundos) e piezômetros executados no entorno do lago, bem como de marcos topográficos localizados dentro do lago para medição de nível da lagoa, sendo estes dados utilizados para a confecção do mapa potenciométrico;
- Levantamento de 28 poços de monitoramento distribuídos na área da fábrica e dos níveis dos córregos existentes a leste e a oeste da mesma, também utilizados na confecção do mapa potenciométrico.

Esta atividade consistiu nos levantamentos planialtimétrico e cadastral das coordenadas x, y e z de todos os pontos considerados no mapa potenciométrico, realizado pela empresa especializada MOURA TOPOGRAFIA, utilizando-se os equipamentos listados abaixo.

- 01 Estação Total Servo (AUTOLOCK ROBOTICA) com movimento contínuo precisão angular 2", marca GEODIMETER;
- 01 Nível Geométrico marca WILD precisão horizontal 3mm/km;
- 01 Mini Prisma para levantamento de edificações;
- 01 Sistema de Automação topoGRAPH.

## 5.6. ENSAIOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO TIPO *SLUG TEST*

Esta etapa do trabalho consistiu na realização de 20 ensaios do tipo *slug test* para a medição da condutividade hidráulica do aquífero. Tais dados foram utilizados no cálculo da velocidade da água subterrânea e, por conseguinte, do movimento advectivo da pluma contaminante.

Esse ensaio compreende a introdução de um tarugo de volume conhecido no poço, causando o deslocamento de um volume de água. A partir desse momento é acompanhada a recuperação do nível de água até alcançar 80% da variação ( $\Delta h$ ) inicial ou 30 minutos de ensaio. Com esses resultados e outros dados construtivos dos poços de monitoramento (diâmetro e profundidade), calcula-se a condutividade hidráulica do aquífero em escala local. A unidade de condutividade hidráulica (K) é  $LT^{-1}$ .

A grande vantagem deste teste é que, além de rápido e barato, permite determinar os valores de condutividade hidráulica em poços de pequeno diâmetro. Outra grande vantagem desse teste é que no caso de áreas contaminadas, não é necessário o tratamento de grandes quantidades de água, no caso da utilização do teste de rebaixamento ou recuperação através de bombeamento.

A variação dos níveis de água foi acompanhada durante o ensaio por registradores automáticos de nível (*Levellogger* com transdutores de pressão), tornando as leituras de nível de água mais precisas e conseqüentemente os resultados dos ensaios.

A interpretação dos dados obtidos nos ensaios foi realizada através da equação de *Bouwer & Rice* de 1976, com auxílio do *software Aquifertest 3.5* desenvolvido pela *Waterloo Hydrogeologic*, que permite uma fácil entrada de dados e interpretação dos testes.

## 5.7. DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE FLUXO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

Em cada campanha de amostragem ao longo de um ano hidrogeológico foram medidos os níveis de água de todos os poços de monitoramento existentes na fábrica, bem como dos piezômetros e do lago. As cargas hidráulicas dos poços monitorados foram calculadas subtraindo-se as cotas absolutas da boca dos poços, dos níveis de água estáticos medidos com medidor elétrico convencional da marca Hidrosuprimentos. Mapas potenciométricos foram confeccionados com os valores de carga hidráulica calculados para os meses de julho de 2004, outubro de 2004, março de 2005 e outubro de 2005, caracterizando a direção preferencial do fluxo de água subterrânea no aquífero e suas variações ao longo um ano hidrogeológico, o gradiente hidráulico e a velocidade de fluxo da água, utilizando-se a equação de Darcy.

## 5.8. AMOSTRAGEM DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

O procedimento adotado durante a amostragem seguiu o *Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas* da CETESB (1999), consistindo em:

- Purga do Poço: retirada de três a quatro vezes o volume de água contida no poço. Tem o objetivo de se eliminar a água cujas características (devido a processos de volatilização, oxidação e complexação) podem não ser representativas da água da formação (USEPA, 1985) e a pouca circulação da água e o seu contato prolongado com as paredes do poço pode gerar um ambiente físico-químico não condizente com aquele apresentado pelo aquífero. Para tanto se utilizou um *bailer* descartável de polietileno para cada poço.
- Recuperação do nível de água: após a purga, aguardou-se a recuperação do nível de água do poço para então iniciar o processo de coleta;
- Amostragem de água e determinações de parâmetros físico-químicos *in situ*: as amostras foram coletadas com o *bailer* descartável de polietileno para cada poço, sendo filtradas em um porta-filtro de acetato da marca Nalgene contendo filtro de acetato celulose (0,45 $\mu$ m) da marca Millipore, conectado a uma bomba manual de vácuo da marca Nalgene. Numa alíquota separada de água foram medidos os parâmetros físico-químicos da água subterrânea através de equipamentos portáteis de campo;
- Preservação de Amostras: após a filtragem, as amostras foram armazenadas em frascos descartáveis de polietileno. As amostras coletadas para análise de cátions foram acondicionadas em frascos de 200mL e preservadas com HNO<sub>3</sub> com concentração 1:1 e mantidos a uma temperatura não superior a 4°C (CETESB, 1999). As amostras para ânions foram acondicionadas em frascos de 200mL e preservadas sob congelamento. As amostras para metais e boro foram mantidas em frascos de 500mL fornecidos pelo laboratório e preservadas a uma temperatura não superior a 4°C. No caso dos metais, as mesmas foram preservadas também com HNO<sub>3</sub> (1:1).

Todo o material não descartável utilizado durante a amostragem foi previamente lavado com água corrente e detergente neutro e enxaguado com água destilada.

Para fins de controle de interferência na amostra durante o processo de amostragem, foram coletadas em campo a cada campanha, uma amostra de referência ou branco de equipamento (amostra denominada PM-01A), que constitui em água destilada passada pelo amostrador (*bailer* descartável de polietileno) e acondicionada no frasco fornecido pelo laboratório.

Visando verificar os resultados analíticos de metais e boro emitidos pelo laboratório Bioagri Ambiental, foram coletadas amostras em duplicata na primeira campanha, dos pontos com maior potencial de impacto. As amostras foram encaminhadas ao laboratório CEIMIC para análise quanto a metais, incluindo o boro.

Os poços amostrados durante as campanhas foram definidos com base nos seguintes critérios:

- distribuição espacial das amostras de forma a obter-se um conjunto de dados representativos de toda a área de estudo, mapear os limites da pluma de boro e permitir o entendimento do comportamento do boro ao longo de um ciclo hidrogeológico;
- possibilidade de acesso aos poços, já que alguns deles não foram encontrados em época de cheia e outros foram tamponados;
- tempo e recursos financeiros disponíveis para a realização das coletas e análises químicas.

Uma primeira campanha de amostragem de água subterrânea foi realizada no período de 02 a 06 de julho de 2004, cujos pontos amostrados foram:

- os sete poços permanentes (PM-01 a PM-07) e três poços provisórios (PP-01, PP-03 e PP-07) instalados por uma empresa em julho de 2003;
- um poço permanente (PM-58) instalado por uma segunda empresa em agosto de 2003;
- os 13 poços (PM-08 a PM-20) instalados em junho de 2004 e;
- as duas amostras da água do lago (Lago NE e Lago SE).

Os 24 poços de monitoramento foram coletados, sendo rotulada a amostra com a sigla do poço (PM-01 a PM-20, PP-01, PP-03, PP-07 e PM-58), seguido da data de coleta. Os parâmetros analisados nessa primeira campanha foram os metais, incluindo o boro.

Após a instalação dos poços de monitoramento profundos, uma continuação da primeira campanha foi realizada em 14 de outubro de 2004, para o parâmetro boro no PM-01, PM-01P e PM-10P.

A segunda campanha de amostragem ocorreu entre os dias 28 e 31 de março de 2005, onde dentre os poços existentes na área, selecionaram-se 21 poços, amostrados para boro, ânions e cátions. Nessa campanha coletou-se também uma amostra de água superficial (Lago N).

A terceira campanha de amostragem ocorreu entre os dias 20 e 29 de outubro de 2005, onde 28 pontos foram amostrados, dentre eles, 20 poços de monitoramento, três piezômetros,

um furo de sondagem (S-48) e uma amostra de água superficial do lago (Lago N) para os parâmetros boro, ânions e cátions.

A Tabela 5.5 descreve as campanhas de amostragem de água subterrânea e água superficial, bem como a relação dos pontos amostrados, das amostras e suas características.

### 5.9. AMOSTRAGEM DE ÁGUA SUPERFICIAL

A água do lago foi amostrada na primeira campanha (julho de 2004) em dois pontos diferentes, sendo a amostra Lago E retirada na margem leste do lago (próxima ao antigo ponto de chegada de efluentes ao lago) e a amostra Lago SE, retirada próxima ao PAR 3A, poço receptor de efluente industrial. Na segunda e terceira campanha de monitoramento (março e outubro de 2005), amostrou-se apenas um dos pontos mais profundos da lago (Lago N). Os procedimentos de coleta da água superficial obedeceram aqueles adotados para amostragem de água subterrânea.

Tabela 5.5 – Campanhas de amostragem de água superficial e subterrânea.

Data da amostragem	Pontos amostrados	Total de pontos amostrados	Parâmetros analisados <i>in situ</i>	Parâmetros analisados em laboratório
1ª Campanha 02/07 a 06/07/2004	PM-01, PM-02, PM-03, PM-04, PM-05, PM-06, PM-07, PM-08, PM-09, PM-10, PM-11, PM-12, PM-13, PM-14, PM-15, PM-16, PM-17, PM-18, PM-19, PM-20, PM-58, PP-01, PP-03, PP-07, Lago NE e Lago SE	24	pH, Eh, temperatura e condutividade elétrica	boro
Continuação da 1ª Campanha 14/10/2004	PM-01, PM-01P, PM-10P	03	pH, Eh, temperatura e condutividade elétrica	boro
2ª Campanha 28/03 a 31/03/2005	PM-01, PM-01P, PM-03, PM-05, PM-06, PM-08, PM-09, PM-10, PM-10P, PM-11, PM-12, PM-13, PM-14, PM-15, PM-18, PM-19, PM-20, PM-58, PP-02, PP-03, PP-06 e Lago N	23	pH, Eh, temperatura e condutividade elétrica	boro, Fe <sup>2+</sup> , ânions e cátions
3ª Campanha 20/10 a 29/10/2005	PM-01P, PM-03, PM-05, PM-06, PM-08, PM-09, PM-10, PM-10P, PM-11, PM-12, PM-13, PM-14, PM-15, PM-18, PM-19, PM-20, PM-58, PP-02, PP-03, PP-06, PZ-02, PZ-03, PZ-05, S-48 e Lago N	25	pH, Eh, temperatura, condutividade elétrica e TDS em algumas amostras	boro, Fe <sup>2+</sup> , ânions e cátions

TDS - Sólidos Totais Dissolvidos; Ânions: Al<sup>total</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Fe<sup>total</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>; Cátions: Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, F<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sup>2-</sup> e NO<sup>3-</sup>.

### 5.9.1. Análises Químicas

A caracterização físico-química da água subterrânea e superficial foi baseada na medição dos parâmetros pH, Eh, condutividade elétrica, temperatura e sólidos totais dissolvidos (STD) em algumas amostras, medidos em campo a partir de equipamentos portáteis (Tabela 5.6).

Outro parâmetro medido em campo foi a alcalinidade, expressa em mg/L de bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ). A técnica adotada foi a titulação, com a utilização de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) 0,0098N, padronizado em laboratório com  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  e indicador misto para detectar o ponto de viragem.

Tabela 5.6 – Equipamentos utilizados para a determinação dos parâmetros físico-químicos.

Parâmetros	Equipamentos
Eh / pH / Temperatura	WTW 330/SET1
Condutividade Elétrica	WTW LF330/SET
Sólidos Totais Dissolvidos (TDS)	-----x-----

HANNA Instruments /  
Waterproof Family

As análises químicas realizadas em laboratório incluíram os cátions, os ânions, o boro e o  $\text{Fe}^{2+}$ . Os métodos analíticos utilizados nos laboratórios e os limites de detecção obtidos para cada parâmetro são apresentados nas Tabelas 5.7 e 5.8.

Tabela 5.7 – Relação dos parâmetros analisados em laboratório e respectivos métodos analíticos.

Parâmetros	Método / Técnica	Laboratório
$\text{Al}^{\text{total}}$ , $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Fe}^{\text{total}}$ , $\text{K}^+$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{Mn}^{2+}$ , $\text{Na}^+$	EPA 6010 / ICP-AES	Laboratório de Química e ICP-AES DMG/IGc/USP
$\text{Cl}^-$ , $\text{SO}_4^{2-}$ , $\text{F}^-$ , $\text{Br}^-$ , $\text{HPO}_4^{2-}$	Cromatografia iônica	Laboratório de Hidrogeoquímica do CEPAS/IGc/USP
$\text{NO}_2^-$ e $\text{NO}_3^-$	Cromatografia iônica	Laboratório de Hidrogeoquímica do CEPAS/IGc/USP
B	SMEWW 3120B / ICP	Bioagri Ambiental Ltda.
$\text{Fe}^{2+}$	SM 3500 – FeB / <i>Phenanthroline Method</i>	Bioagri Ambiental Ltda.

Tabela 5.8 – Limites de detecção obtidos para cada parâmetro.

Parâmetro	Limite de detecção (mg/L)	Parâmetro	Limite de detecção (mg/L)
$\text{Al}^{\text{total}}$	0,010	$\text{Cl}^-$	0,070 (MAR) / 0,013 (OUT)
$\text{Fe}^{\text{total}}$	0,002	$\text{SO}_4^{2-}$	0,020 (MAR) / 0,002 (OUT)
$\text{Ca}^{2+}$	0,100	$\text{F}^-$	0,016 (MAR) / 0,002 (OUT)
$\text{K}^+$	0,500	$\text{Br}^-$	0,005 (MAR) / 0,001 (OUT)
$\text{Mg}^{2+}$	0,100	$\text{NO}_2^- - \text{N}$	0,005 (MAR) / 0,006 (OUT)
$\text{Mn}^{2+}$	0,010	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	0,011 (MAR) / 0,026 (OUT)
$\text{Na}^+$	0,100	B	0,050 (MAR) / 0,010 (OUT)
$\text{Fe}^{2+}$	0,050 (MAR) / 0,010 (OUT)	$\text{HPO}_4^{3-}$	0,010

MAR – março de 2005; OUT – outubro de 2005.

## 5.10. CONFIABILIDADE DOS RESULTADOS ANALÍTICOS E TRATAMENTO DOS DADOS

Um fator muito importante a ser considerado em toda análise de dados em hidroquímica está relacionado à confiabilidade dos resultados obtidos. A acurácia dos resultados analíticos depende de uma série de fatores muito mais do que os próprios métodos utilizados, estando relacionada também à habilidade do técnico, tipo de instrumentação e calibração, magnitude dos efeitos contaminantes ou até mesmo erros de amostragem. Todo o laboratório, no entanto, precisa controlar tanto a precisão como a exatidão dos seus resultados em grau de concordância entre os valores medidos e o valor real.

O cálculo do balanço iônico e envio de amostras duplicatas consistem em procedimentos mais comuns adotados para avaliar a qualidade dos resultados obtidos. O balanço iônico foi efetuado em todas as amostras coletadas nas campanhas de março de 2005 e outubro de 2005, para assegurar se o erro estava dentro do limite permitido, geralmente entre  $\pm 10\%$ .

A porcentagem do erro do balanço iônico para todas as amostras totais foi calculada a partir dos valores em miliequivalentes (meq) dos ânions e cátions segundo a equação (CUSTODIO & LLAMAS, 1996):

$$\text{Erro} = \frac{\sum \text{cations} - \sum \text{anions}}{\sum \text{cations} + \sum \text{anions}} \times 100$$

Após a realização das análises químicas e físico-químicas e checagem dos resultados através do balanço iônico, os resultados foram tabelados e interpretados, utilizando-se alguns tratamentos estatísticos, bem como outras formas de interpretação de dados, descritas a seguir:

1) Classificação geoquímica das águas subterrâneas, utilizando-se as concentrações dos íons maiores na água ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{Cl}^-$ ) convertidas em meq/L, tabeladas e lançadas em diagramas triangulares de Piper, calculando-se as porcentagens em relação à soma de cátions e ânions de cada amostra. Para tal caracterização, utilizou-se o *software* Hydro Chem adquirido, via internet, no *site* da *Rock Ware Earth Science Software*. Os diagramas de Piper foram confeccionados para cada campanha de amostragem, com suas respectivas amostras.

2) Realização de uma análise estatística multivariada dos resultados químicos e físico-químicos em todas as campanhas de amostragem através dos coeficientes de correlação linear ( $r$ ) de Pearson, segundo a fórmula:

$$r = \frac{(\sum XY - (\sum X \sum Y)) * n}{\sqrt{((n * (\sum X^2 - (\sum X)^2))) * (n * (\sum Y^2 - (\sum Y)^2)))}}$$

Onde n é o número de pares de valores para x e y.

Tal tratamento foi feito com o intuito de avaliar o comportamento relativo entre os diferentes compostos presentes na água e suas possíveis correlações. A fim de melhor visualizar estas relações, utilizou-se também de um teste de correlação linear onde foi adotado um nível de significância de 5% (DAVIS, 1986):

$$T(r) = \frac{\sqrt{n-3}}{2} \ln \frac{(1+r)}{1-r}$$

Onde:

n= número de pares

r = coeficiente de correlação de Pearson

Neste caso, aceita-se a hipótese da existência de correlação entre dois parâmetros, com 5% de significância, se o coeficiente de correlação (r) entre eles for tal que  $T(r) > 1,96$  ou  $T(r) \leq -1,96$ , foram considerados os pares cuja hipótese de existência de correlação apresentasse valores de T(r) dentro deste intervalo, sendo desconsiderados aqueles pares cujos valores eram excedentes.

3) Para visualização do comportamento do B e Cl<sup>-</sup> ao longo do tempo, espaço e profundidade, elaborou-se gráficos de concentração *versus* tempo, cota da base da seção filtrante e distância do lago (fonte principal de contaminação) no sentido do fluxo subterrâneo.

4) Visando a avaliação dos padrões de distribuição e as concentrações dos parâmetros boro e cloreto em área, realizou-se uma análise espacial, utilizando-se o método de krigagem ordinária, confeccionando-se mapas de isoconcentração para os parâmetros citados acima para as estações seca e úmida, nos quais foram traçadas curvas de mesmo valor. Para tanto, utilizou-se o programa SURFER, versão 8.0 da *Golden Softwares, Inc.* para interpolação e confecção dos mapas.

5) Além da interpretação geoquímica das águas superficial e subterrânea, os resultados das análises químicas (concentrações de íons e boro) foram comparados aos padrões de referência descritos no item 3.5, conforme política de gerenciamento da CETESB (2005).

## **6. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

### **6.1. FONTES POTENCIAIS DE IMPACTO DO SUBSOLO**

A principal fonte de impacto do aquífero é o lago, que recebe efluentes industriais e sanitários tratados.

O histórico do lago é baseado em informações verbais de antigos funcionários da empresa e em fotos aéreas, cuja data mais antiga é de meados dos anos 60. Os registros fotográficos demonstram que o lago é anterior à década de 70, quando ainda operava no local uma indústria que produzia cubos e tambores de freio e usinava discos. Não há nenhum registro oficial que esclareça a natureza do lago (se natural ou artificial). As informações verbais também não definem sua origem, conhecendo-se somente que havia um fio de água no local que foi utilizado pela indústria anterior para testes de motores; sendo posteriormente abastecido por águas pluviais e águas trazidas de fontes da serra, sendo finalmente abastecido por efluentes industriais tratados.

Não se tem registros se o lago recebia efluentes em época anterior à década de 70, mas recebeu efluente pós-tratamento da Estação de Tratamento de Resíduos Industriais (ETRI) desde 1974 até maio de 2003, bem como da Estação de Tratamento de Efluentes Sanitários (ETES) a partir de 1979. O principal efluente gerado e tratado na produção é a emulsão oleosa dos processos de usinagem, sendo a principal função da ETRI, separar o óleo solúvel da água, enquanto na ETES, a água passa por tratamento biológico em lodo ativado. Atualmente, o lago ainda recebe esporadicamente efluente pós-tratamento de ambas as estações (ETRI e ETES), bem como da rede de águas pluviais que captam as águas da cobertura da fábrica de fundição, localizada na porção norte do lago.

Conforme Auto de Inspeção da CETESB nº 702163, foi verificado também que após manutenção de máquinas, 3.000L de óleo solúvel foram descartados no lago através da galeria de águas pluviais localizada na porção norte do lago em dezembro de 1997; e conforme o Auto de Inspeção nº 760547, houve extravasamento nas piscinas de armazenamento de borra oleosa localizadas na ETRI, que alcançou a porção oeste do lago em abril de 1999.

#### **6.1.1. Fonte Primária de Boro**

Segundo informações verbais de funcionários da empresa, o boro está presente na composição de fungicidas constituintes de óleos refrigerantes sintéticos (Sintilo 920, Quakercool 2776, Ecocool MH6000, Microcut B 6545, Hysol 6545 e Greencool 2510), utilizados na fábrica a partir de janeiro de 1996, em substituição aos óleos de origem mineral. Ao longo da utilização de tais óleos solúveis, notou-se que as concentrações de boro no efluente não eram reduzidas através do tratamento físico-químico da ETRI, estando estas em desacordo com o

Artigo 18 do Decreto Estadual 8468 (1976), o que levou à eliminação da utilização dos óleos sintéticos, cessada a partir de maio de 2003. Portanto, os lançamentos de efluentes ricos em boro causaram um acúmulo deste elemento no lago, afetando conseqüentemente a qualidade da água subterrânea rasa do Aquífero Taubaté.

### **6.1.2. Outras Fontes de Contaminação**

Além do lago, o sistema de tratamento de efluentes que data de 1974, incluindo a ETRI e o sistema coletor de efluentes, composto por tubulações subterrâneas e poços coletores (PARs) subterrâneos de concreto são fontes potenciais de vazamentos e, portanto, de impacto ao subsolo. A localização das redes de efluente industrial e dos poços de água residuária (PARs) pode ser visualizada na Figura 5.1. O PAR 3A, próximo aos poços PM-07, recebe os efluentes de uma das fábricas e tem dimensões de 3mx1,5mx5m e é conectado pela linha de efluente ao outro PAR3A' de dimensões semelhantes, e que por sua vez, é conectado ao PAR3B de dimensões 3,0mx4,0mx7,0m, ligado à ETRI por tubulação subterrânea.

Não há histórico ou registro de fugas ao longo da linha de efluente industrial, porém, registros de resíduos derivados de petróleo foram observados nas sondagens de investigação do subsolo (S-12, S-22, S-27, S-28, S-29 e S-30, Figura 5.1) situadas próximas aos PARs 3A e 3A', ao longo da linha de efluente industrial.

### **6.1.3. Composição Química do Efluente**

Análises químicas do efluente pós-tratamento que abrangem o Artigo 18 do Decreto Nº 8468 (1978) foram disponibilizadas pelo responsável da indústria. Tais análises químicas abrangem os metais (Pb, Cu, Cr, Sn, Fe e Mn nas formas totais e solúveis e Zn), F<sup>-</sup>, B, pH, óleos e graxas, DBO, DQO e fenóis. Para o presente estudo, os parâmetros de interesse são o pH, B, Fe e Mn solúvel. O intervalo dos resultados analíticos dos meses de março e outubro de 2005 podem ser visualizados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Parâmetros analisados nos efluentes industrial e sanitário.

Parâmetros	Efluente Industrial		Efluente Sanitário	
	MAR/2005	OUT/2005	MAR/2005	OUT/2005
pH	5,90 - 6,90	6,80 - 6,90	6,90 - 7,40	7,20 - 7,50
B (mg/L)	0,22 - 0,41	0,88 - 0,96	0,06 - 0,09	0,18 - 0,25
Fe solúvel (mg/L)	1,92 - 11,30	<0,05	0,18 - 0,28	<0,01
Mn solúvel (mg/L)	1,00 - 1,36	<0,05	0,08 - 0,20	<0,01

Tais resultados demonstram que apesar do tratamento, ainda existem concentrações de íons (B, Fe e Mn) significativas nos efluentes industriais e em menor proporção no efluente

sanitário, indicando que podem estar colaborando com as altas concentrações de íons ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ ) observadas na água do lago e na água subterrânea (item 6.4.2). Tal hipótese pode ser corroborada através dos constituintes utilizados no tratamento dos efluentes: ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ), hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ) e sulfato de alumínio [ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ]. Ressalta-se que o pH dos efluentes varia de ácido a neutro, diferente do pH alcalino do lago.

## **6.2. CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO DA ÁREA**

Localmente, o aquífero estudado é do tipo livre, de porosidade primária, associado aos sedimentos fluviais da Seqüência Pindamonhangaba (IPT, 1990) do Grupo Taubaté. Esse aquífero apresenta uma espessura média de 20m, como atesta o perfil construtivo do poço tubular profundo localizado aproximadamente 50m do lago (PTP-01). Sob este pacote encontram-se ainda intercalações das rochas sedimentares terciárias arenosas e argilosas, iniciando com uma camada de argilito cinza, intercalada por folhelhos e arenitos até a profundidade de 442m a partir da superfície, onde encontram o cristalino composto por rochas gnáissicas fraturadas.

Topograficamente, a área em estudo compõe-se por um platô nivelado entre 573 e 569m de altitude, onde existe um lago. Existem dois baixos topográficos a leste e a oeste deste platô, onde correm respectivamente o córrego do Judeu, parcialmente canalizado em cotas de 558 a 546m, e o córrego do Pinhão, em cotas de 552 a 542m, constituindo zonas de descarga local.

A recarga do aquífero está associada às áreas não impermeabilizadas, bem como pela própria lagoa na porção central da fábrica, que se comporta de forma influente em relação ao aquífero.

### **6.2.1. Variação do Nível de Água**

As diversas campanhas de medição de nível de água (NA) existentes desde o ano de 2003 estão listadas abaixo e apresentadas no Anexo III, com todos os dados de nível de água existentes na área ao longo do tempo:

- 1) Julho de 2003 – PM-01 ao PM-07 e PP-01 ao PP-07 (entorno do Lago).
- 2) Setembro de 2003 – PM-54 ao PM-58 (localizados na Área Fabril).
- 3) Julho de 2004 – poços já existentes no entorno do Lago (PM-01 ao PM-07 e PP-01 ao PP-07) e os novos poços instalados até julho de 2004 (PM-08 a PM-20, PZ-01, PZ-02 e PZ-03).
- 4) Outubro de 2004 (Planta Geral) – todos os poços monitoramento conhecidos na área industrial (dentro e fora da área foco desta investigação), além de medidas do nível do lago em marco topográfico e medidas de nível dos córregos vizinhos, também em marcos referenciais incluídos no levantamento topográfico.
- 5) Janeiro, março e outubro de 2005 (Planta Geral).

Comparando-se as cargas hidráulicas (CH) no aquífero e no lago ao longo do tempo (Figura 6.1), verifica-se que os poços localizados no entorno do lago (PM-01 a LAGO) apresentam cargas hidráulicas mais altas que aqueles mais distantes a ele (PM-21 a PM-59, com exceção do PM-58, localizado próximo ao lago). Nota-se CH mais altas em período de cheia (janeiro e março de 2005) do que no período de seca (julho e outubro de 2004, e outubro

de 2005). Na estação de seca, as CH são relativamente mais profundas no mês de outubro que em julho, indicando final de estiagem.

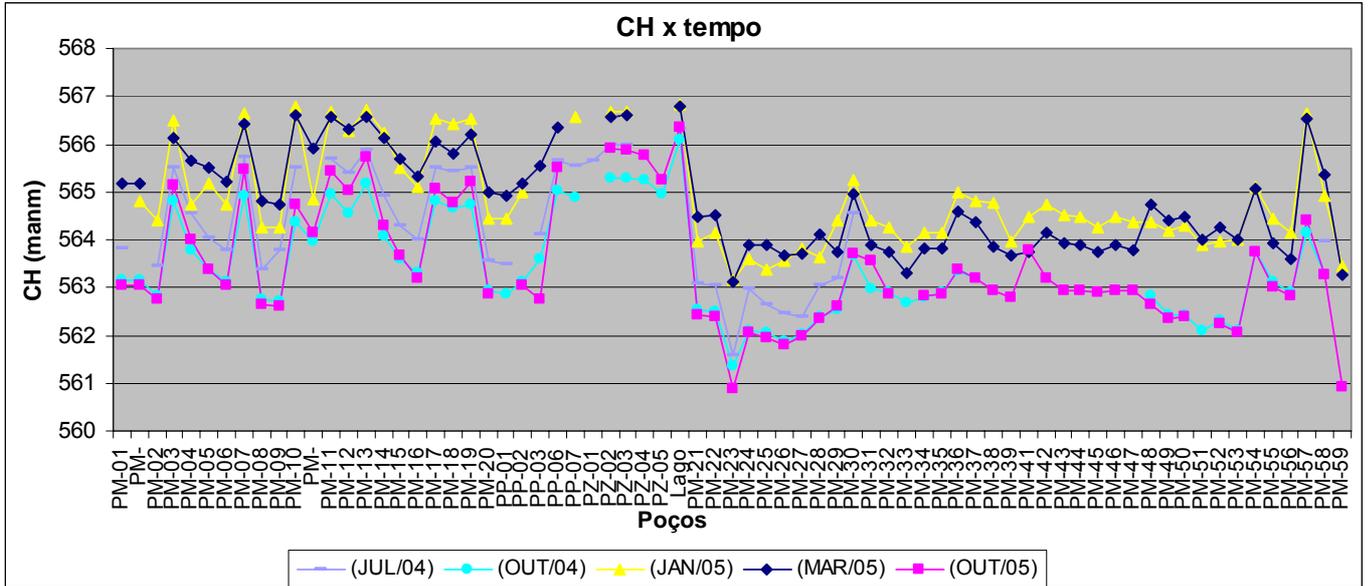


Figura 6.1: Comparação de cargas hidráulicas ao longo do tempo.

As profundidades dos níveis de água no aquífero variam em média entre 0,22m (PZ-03) e 6,33m (PM-59) no verão e entre 1,12m (PZ-03) e 7,90m (PM-59) no inverno, enquanto as cargas hidráulicas variam entre 566,80manm (Lago) e 563,12manm (PM-23) na época de cheia (verão) e entre 566,25manm (Lago) e 561,27manm (PM-23) na época de seca (inverno).

A Figura 6.2 mostra relativa homogeneidade na variação das CH nos poços durante um ano hidrogeológico (2005), com amplitudes mínima e máxima iguais a 0,45 (lago) e 2,79 (PP-03) respectivamente, e amplitude média igual a 1,50m.

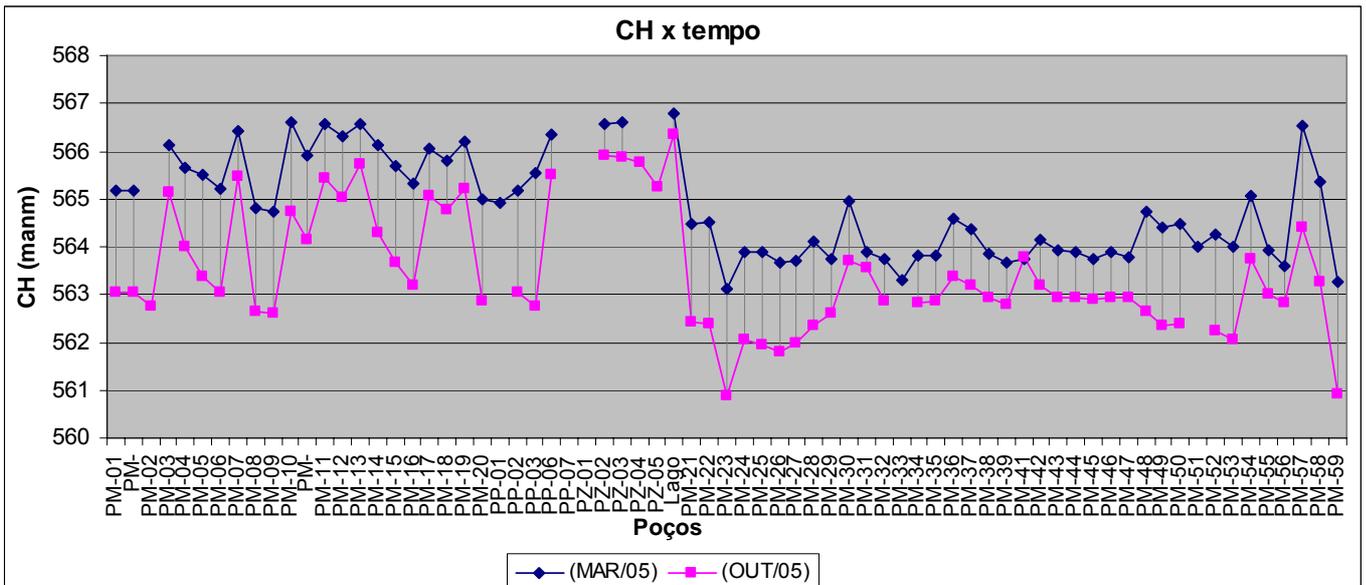


Figura 6.2: Comparação de cargas hidráulicas ao longo de um ano hidrogeológico (2005).

## 6.2.2. Potenciometria

O contexto hidrogeológico discutido nesse item caracteriza o fluxo da água subterrânea durante as três campanhas de amostragem de água (julho de 2004, março de 2005 e outubro de 2005), bem como para a campanha de medição de NA de outubro de 2004 (Anexo III).

Para tal caracterização, mapas potenciométricos foram confeccionados para cada campanha (Figuras 6.3, 6.4, 6.5 e 6.6) através da medição de todos os pontos de CH existentes dentro da unidade industrial (Área Fabril) e um ponto tomado em cada córrego (Córrego do Pinhão I e Córrego do Judeu I), com exceção da campanha de julho de 2004, que abrangeu somente os pontos de carga no entorno do lago (Anexo III).

Quatro pontos de carga hidráulica adicionais (Córrego do Pinhão II e III, Córrego do Judeu II e III) foram calculados a partir da cota da base do córrego obtida através do gradiente topográfico (mapa topográfico escala 1:10.000; IGC, 1978), acrescidas da lâmina de água nos pontos de medição (Córrego do Pinhão I e Córrego do Judeu I).

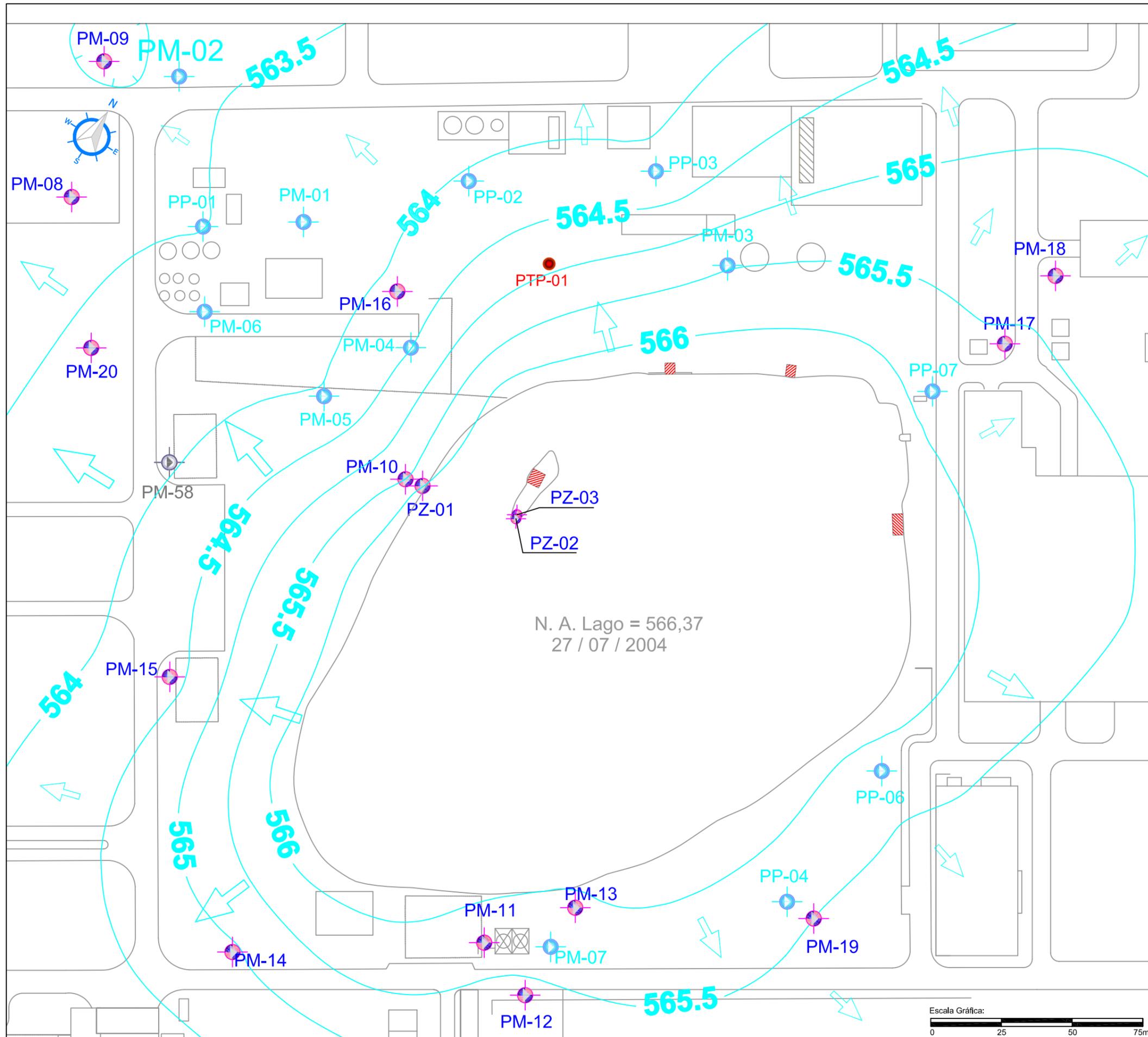
As principais conclusões obtidas através dos mapas potenciométricos foram:

- Fluxo subterrâneo radial do lago para o aquífero.
- Superfície potenciométrica pouco inclinada na maior parte da área fabril, ou seja, baixo gradiente hidráulico, sendo observado um maior adensamento de linhas equipotenciais em direção aos córregos e no entorno próximo ao lago.
- A máxima carga hidráulica na área fabril é a do lago, enquanto a mínima é a do PM-23, localizado rumo NW da fábrica. No entorno próximo ao lago, a mínima carga é predominantemente do PM-09 (Tabela 6.2).

Tabela 6.2 – Cargas hidráulicas e gradientes hidráulicos médios no entorno do lago ao longo do tempo e CH mínimas na área fabril.

	JUL/04	OUT/04	MAR/05	OUT/05
<b>CH mín. (manm)</b>	563,38 (PM-08)	562,72 (PM-09)	564,74 (PM-09)	562,61 (PM-09)
<b>CH máx. (manm)</b>	566,37 (Lago)	566,10 (Lago)	566,79 (Lago)	566,34 (Lago)
<b>i médio (%)</b>	1,73 (PM-08/Lago)	1,84 (PM-09/Lago)	1,12 (PM-09/Lago)	2,03 (PM-09/Lago)
<b>CH mín. (manm) – Área Fabril</b>	---x---	561,34 (PM-23)	563,10 (PM-23)	560,89 (PM-23)

---x--- não medido.



LEGENDA:

- PTP POÇO TUBULAR PROFUNDO DESATIVADO.
- ⊙ PM POÇOS DE MONITORAMENTO PRÉ-EXISTENTES (Outros, 2003).
- ⊙ PM POÇOS DE MONITORAMENTO PRÉ-EXISTENTES (Outros, 2003).
- ⊙ PP POÇOS DE MONITORAMENTO PROVISÓRIOS (Outros, 2003).
- ⊙ PM SONDAGEM COM AMOSTRAGEM DE SOLO E INSTALAÇÃO DE POÇO DE MONITORAMENTO (2004)
- ➔ INDICAÇÃO DE FLUXO SUBTERRÂNEO
- LINHAS EQUIPOTENCIAIS (m)

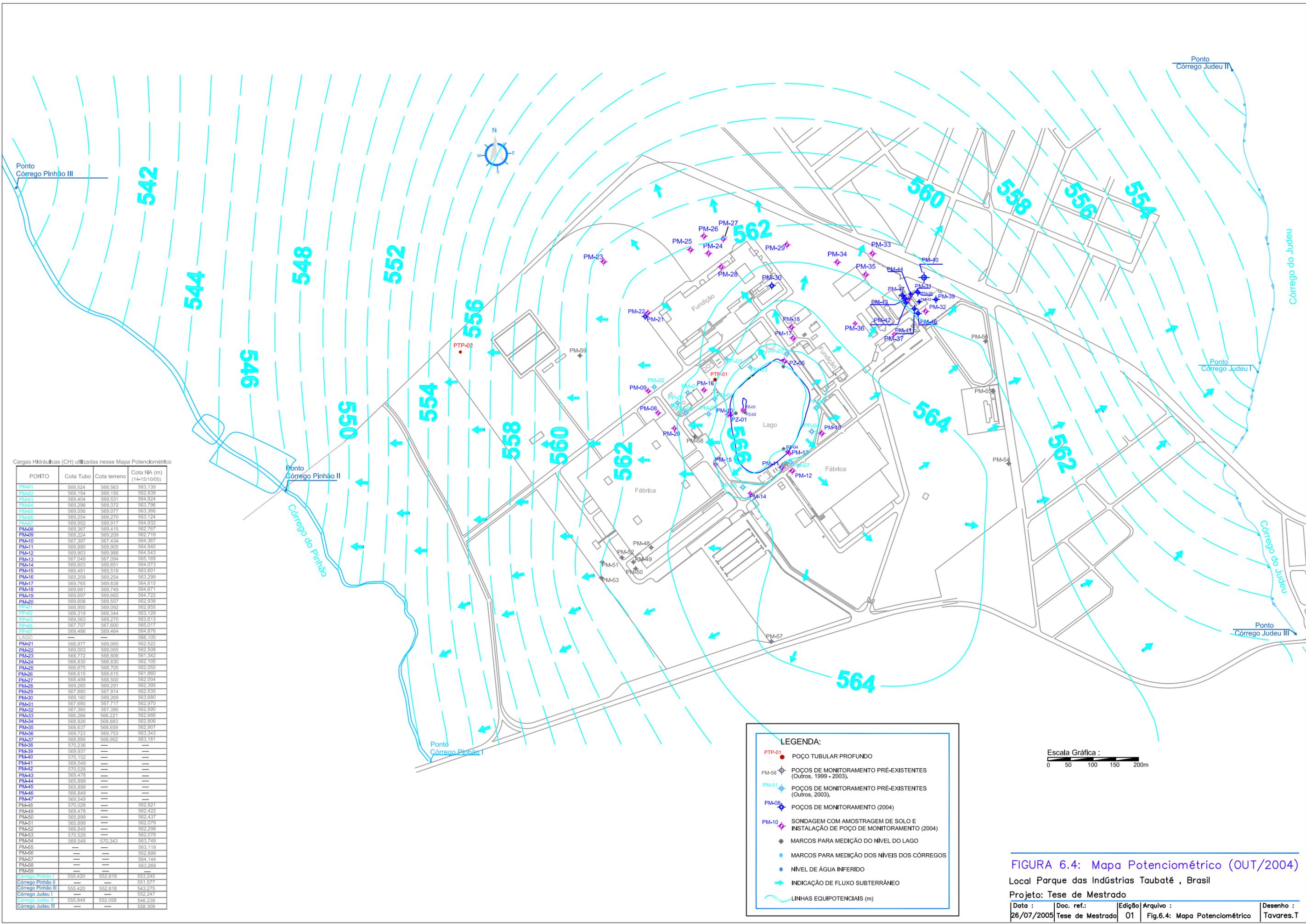
PONTO	Cota Tubo	Cota terreno	Z (carga hidráulica) 27/07/2004
PM-01	569,524	569,563	563,804
PM-02	569,154	569,155	563,464
PM-03	569,404	569,531	565,509
PM-04	569,312	569,372	564,552
PM-05	569,056	569,077	564,046
PM-06	569,254	569,270	563,794
PM-07	569,952	569,917	565,707
PM-08	569,367	569,415	563,377
PM-09	569,224	569,209	563,794
PM-10	567,397	567,434	565,487
PM-11	569,89	569,905	565,67
PM-12	569,903	569,988	565,393
PM-13	567,049	567,094	565,879
PM-14	569,603	569,651	564,913
PM-15	569,481	569,519	564,281
PM-17	569,765	569,838	565,515
PM-18	569,681	569,749	565,431
PM-19	569,697	569,665	565,497
PM-20	569,608	569,557	563,568
PZ-01	566,72	566,550	565,655
PZ-02	566,966	566,312	565,986
PZ-03	566,858	566,426	565,968
PP-01	568,950	569,092	563,704
PP-03	569,563	569,270	563,999
PP-06	567,707	567,600	565,637
PP-07	569,486	569,464	565,536

FIGURA 6.3 Mapa Potenciométrico (JUL/2004)

Local Parque das Indústrias Taubaté , Brasil

Projeto :Tese de Mestrado

Data : Dez/2005	Doc. ref.: Tese de Mestrado	Edição: 01	Arquivo : Fig.6.3: Mapa Potenciométrico	Desenho : Tavares.T
--------------------	--------------------------------	---------------	--	------------------------



Cargas Hidráulicas (CH) utilizadas nesse Mapa Potenciométrico

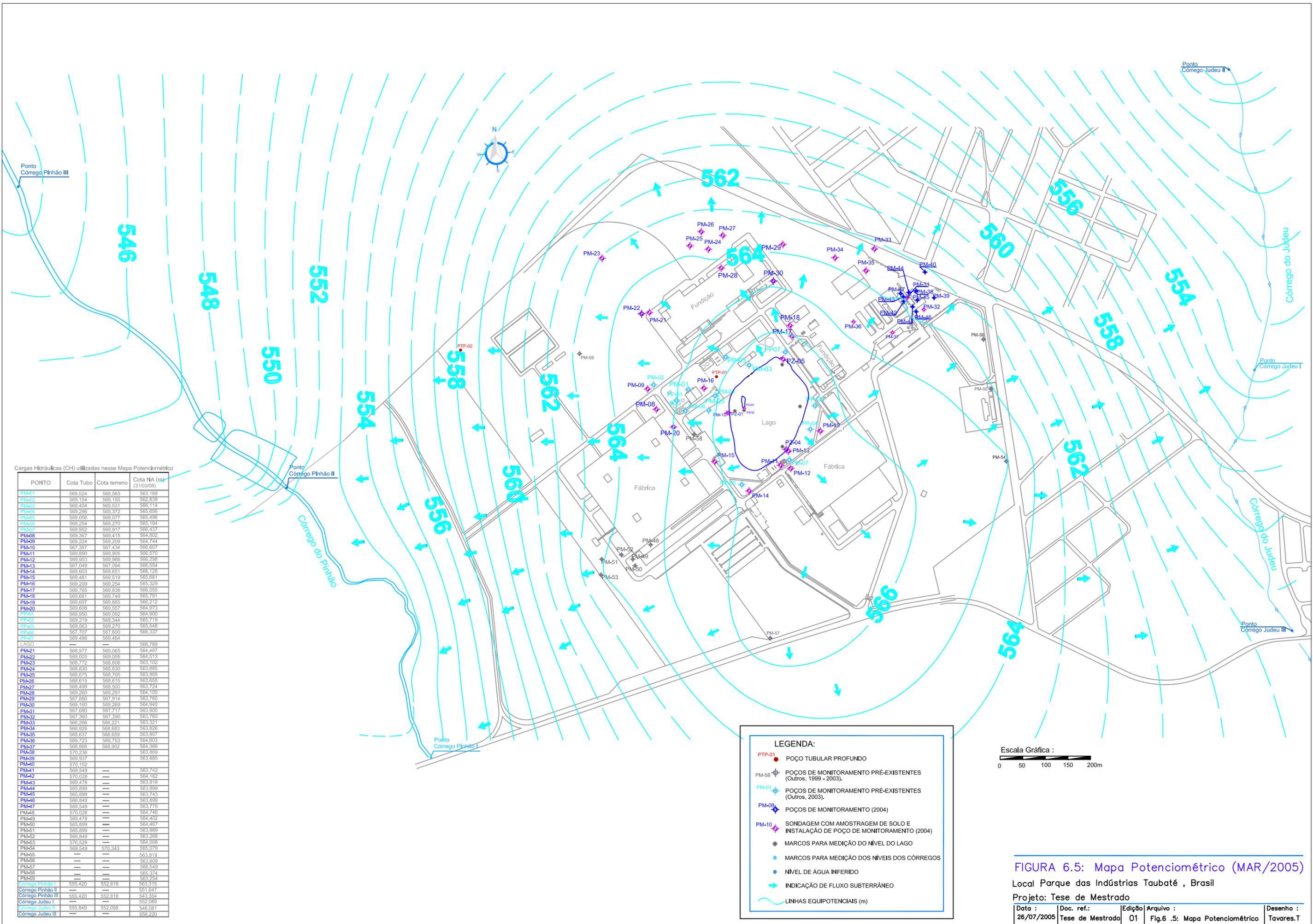
PONTO	Cota Tubo	Cota terreno	Cota NA (m) (14-15/10/05)
PM-01	569.524	568.563	563.139
PM-02	569.154	569.155	562.339
PM-03	569.404	569.531	564.824
PM-04	569.296	569.372	563.796
PM-05	569.056	569.077	563.368
PM-06	569.254	569.270	563.124
PM-07	569.952	569.917	564.932
PM-08	569.367	569.415	562.767
PM-09	569.224	569.209	562.719
PM-10	567.397	567.434	564.367
PM-11	569.890	569.905	564.940
PM-12	569.903	569.988	564.543
PM-13	567.049	567.094	565.169
PM-14	569.603	569.651	564.073
PM-15	569.481	569.519	563.601
PM-16	569.209	569.254	563.299
PM-17	569.765	569.838	564.815
PM-18	569.681	569.749	564.671
PM-19	569.697	569.665	564.722
PM-20	569.606	569.557	562.938
PP-01	568.950	569.092	562.855
PP-02	569.319	569.344	563.129
PP-03	569.563	569.270	563.813
PP-05	567.707	567.800	565.077
PP-07	569.466	569.464	564.076
LAGO	---	---	566.100
PM-21	568.977	569.065	562.522
PM-22	569.003	569.055	562.508
PM-23	568.772	568.806	561.342
PM-24	568.830	568.830	562.705
PM-25	568.875	568.705	562.055
PM-26	568.615	568.615	561.860
PM-27	568.499	568.500	562.004
PM-28	569.260	569.291	562.395
PM-29	567.880	567.914	562.535
PM-30	569.160	569.269	563.860
PM-31	567.680	567.717	562.970
PM-32	567.360	567.390	562.890
PM-33	566.266	566.221	562.666
PM-34	568.926	568.883	562.806
PM-35	568.637	568.659	562.907
PM-36	569.723	569.153	563.343
PM-37	568.866	568.902	563.181
PM-38	570.236	---	---
PM-39	569.937	---	---
PM-40	570.152	---	---
PM-41	569.549	---	---
PM-42	570.028	---	---
PM-43	569.478	---	---
PM-44	565.899	---	---
PM-45	565.899	---	---
PM-46	566.849	---	---
PM-47	569.549	---	---
PM-48	570.028	---	562.821
PM-49	569.478	---	562.422
PM-50	565.899	---	562.437
PM-51	565.899	---	562.079
PM-52	566.849	---	562.298
PM-53	570.529	---	562.078
PM-54	569.549	570.343	563.749
PM-55	---	---	563.119
PM-56	---	---	562.899
PM-57	---	---	564.144
PM-58	---	---	563.269
PM-59	---	---	---
Córrego Pinhão I	555.420	552.818	553.245
Córrego Pinhão II	---	---	551.577
Córrego Pinhão III	555.420	552.818	543.275
Córrego Judeu I	---	---	552.247
Córrego Judeu II	555.849	552.056	546.239
Córrego Judeu III	---	---	558.309

**LEGENDA:**

- PTP-01 ● POÇO TUBULAR PROFUNDO
- PM-58 ◉ POÇOS DE MONITORAMENTO PRÉ-EXISTENTES (Outros, 1999 - 2003).
- PM-01 ◉ POÇOS DE MONITORAMENTO PRÉ-EXISTENTES (Outros, 2003).
- PM-06 ◉ POÇOS DE MONITORAMENTO (2004)
- PM-10 ◉ SONDAGEM COM AMOSTRAGEM DE SOLO E INSTALAÇÃO DE POÇO DE MONITORAMENTO (2004)
- MARCOS PARA MEDIÇÃO DO NÍVEL DO LAGO
- MARCOS PARA MEDIÇÃO DOS NÍVEIS DOS CÓRREGOS
- NÍVEL DE ÁGUA INFERIDO
- INDICAÇÃO DE FLUXO SUBTERRÂNEO
- LINHAS EQUIPOTENCIAIS (m)

Escala Gráfica :  
0 50 100 150 200m

**FIGURA 6.4: Mapa Potenciométrico (OUT/2004)**  
Local Parque das Indústrias Taubaté, Brasil  
Projeto: Tese de Mestrado  
Data : 26/07/2005 | Doc. ref.: Tese de Mestrado | Edição: 01 | Arquivo : Fig.6.4: Mapa Potenciométrico | Desenho : TAVARES.T



Cargas Hidráulicas (CH) utilizadas nesse Mapa Potenciométrico

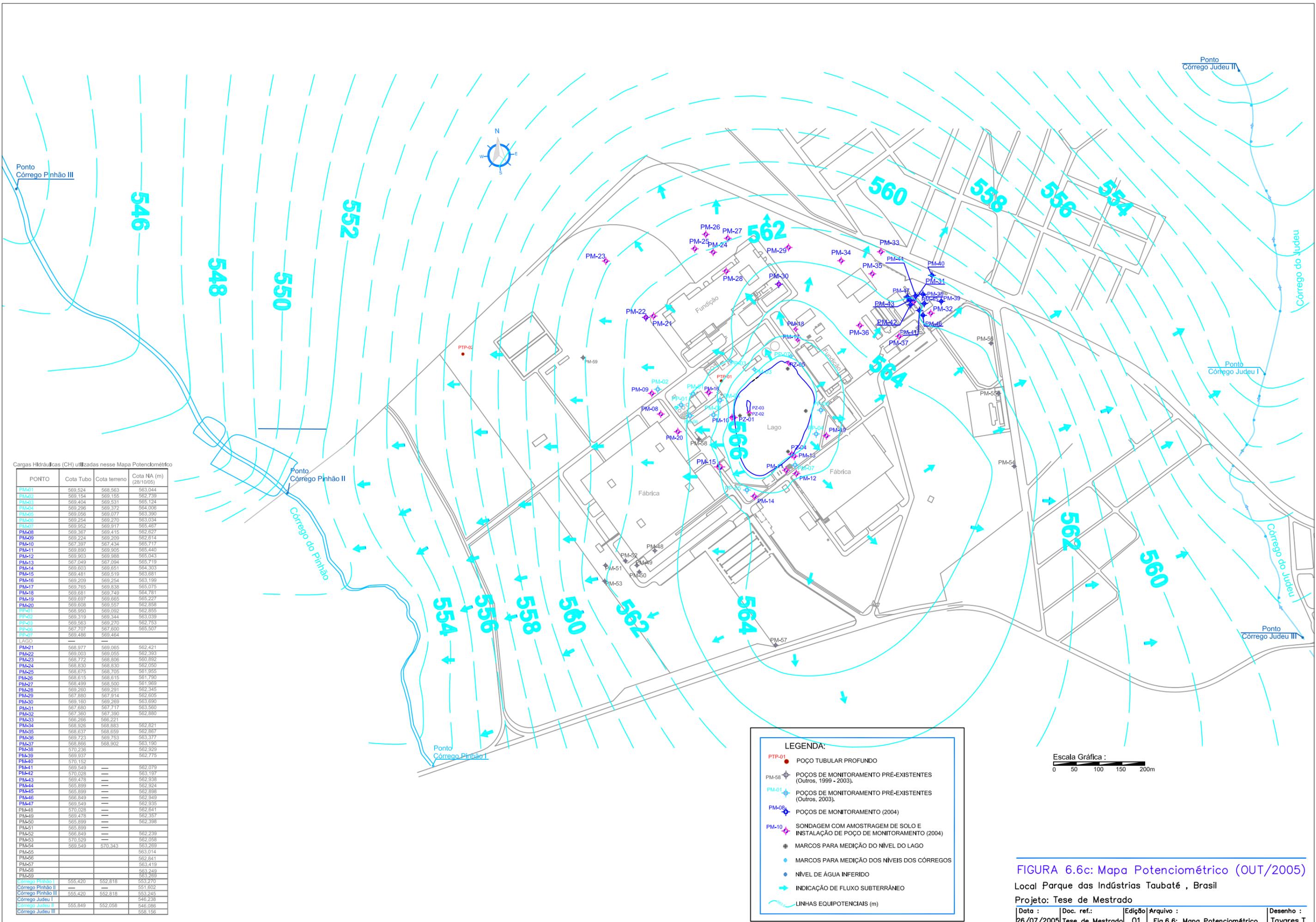
PONTO	Cota Tubo	Cota terreno	Cota NA (m) (31/03/05)
PM-01	569.524	568.563	563.189
PM-02	569.154	569.155	562.839
PM-03	569.404	569.531	566.114
PM-04	569.296	569.372	565.656
PM-05	569.056	569.077	565.496
PM-06	569.234	569.270	565.194
PM-07	569.952	569.917	566.437
PM-08	569.367	569.415	564.802
PM-09	569.224	569.209	564.744
PM-10	567.397	567.434	566.607
PM-11	569.890	569.905	566.570
PM-12	569.903	569.969	566.296
PM-13	567.049	567.094	566.554
PM-14	569.603	569.651	566.128
PM-15	569.481	569.519	565.681
PM-16	569.209	569.254	565.329
PM-17	569.765	569.538	566.055
PM-18	569.681	569.749	565.791
PM-19	569.697	569.665	566.212
PM-20	569.608	569.557	564.973
PP-01	568.950	569.082	564.900
PP-02	569.319	569.344	565.719
PP-03	569.563	569.270	565.548
PP-06	567.707	567.800	566.337
PP-07	569.486	569.464	566.789
LAGO	---	---	566.789
PM-21	568.977	569.065	564.487
PM-22	569.003	569.055	564.513
PM-23	568.772	568.906	563.102
PM-24	568.830	568.830	563.885
PM-25	568.675	568.705	563.905
PM-26	568.615	568.615	563.655
PM-27	568.499	568.500	563.724
PM-28	569.260	569.291	564.100
PM-29	567.880	567.914	563.760
PM-30	569.160	569.269	564.940
PM-31	567.680	567.717	563.900
PM-32	567.360	567.390	563.760
PM-33	566.266	566.221	563.321
PM-34	568.926	569.863	563.826
PM-35	568.637	568.659	563.807
PM-36	569.723	569.753	564.603
PM-37	566.866	568.902	564.366
PM-38	570.236	---	563.869
PM-39	569.637	---	563.885
PM-40	570.152	---	---
PM-41	569.549	---	563.742
PM-42	570.028	---	564.162
PM-43	569.478	---	563.918
PM-44	565.899	---	563.899
PM-45	565.899	---	563.743
PM-46	566.849	---	563.899
PM-47	569.549	---	563.775
PM-48	570.028	---	564.746
PM-49	569.478	---	564.402
PM-50	565.899	---	564.407
PM-51	565.899	---	563.989
PM-52	566.849	---	563.268
PM-53	570.529	---	564.008
PM-54	569.549	570.343	565.079
PM-05	---	---	563.919
PM-06	---	---	563.809
PM-07	---	---	566.549
PM-08	---	---	565.374
PM-09	---	---	563.254
Córrego Pinhão I	555.420	552.818	563.315
Córrego Pinhão II	---	---	551.847
Córrego Pinhão III	555.420	552.818	543.354
Córrego Judeu I	---	---	552.089
Córrego Judeu II	555.849	552.058	546.081
Córrego Judeu III	---	---	558.220

**LEGENDA:**

- PTP-01 ● POÇO TUBULAR PROFUNDO
- PM-58 ◉ POÇOS DE MONITORAMENTO PRÉ-EXISTENTES (Outros, 1999 - 2003).
- PM-01 ◉ POÇOS DE MONITORAMENTO PRÉ-EXISTENTES (Outros, 2003).
- PM-08 ◉ POÇOS DE MONITORAMENTO (2004)
- PM-10 ◉ SONDAGEM COM AMOSTRAGEM DE SOLO E INSTALAÇÃO DE POÇO DE MONITORAMENTO (2004)
- MARCOS PARA MEDIÇÃO DO NÍVEL DO LAGO
- MARCOS PARA MEDIÇÃO DOS NÍVEIS DOS CÓRREGOS
- NÍVEL DE ÁGUA INFERIDO
- INDICAÇÃO DE FLUXO SUBTERRÂNEO
- LINHAS EQUIPOTENCIAIS (m)



**FIGURA 6.5: Mapa Potenciométrico (MAR/2005)**  
 Local Parque das Indústrias Taubaté , Brasil  
 Projeto: Tese de Mestrado  
 Data : 26/07/2005 | Doc. ref.: Tese de Mestrado | Edição: 01 | Arquivo : Fig.6 .5: Mapa Potenciométrico | Desenho : TAVARES.T



**FIGURA 6.6c: Mapa Potenciométrico (OUT/2005)**  
 Local Parque das Indústrias Taubaté, Brasil  
 Projeto: Tese de Mestrado  
 Data : 26/07/2005 | Doc. ref.: Tese de Mestrado | Edição: 01 | Arquivo : Fig.6.6: Mapa Potenciométrico | Desenho : Tavares.T

- O gradiente hidráulico verificado em todos os mapas potenciométricos não é homogêneo na área estudada, sendo menores quanto mais distantes do lago (Tabela 6.3 e Figura 6.7), devido à sua contribuição na recarga do aquífero.
- Os maiores gradientes hidráulicos estão na porção oeste próxima ao lago (PM-10 - Tabela 6.3 e Figura 6.7), tal fato pode estar relacionado à menor seção transversal disponível para o fluxo existente, já que não se observou relação entre o gradiente e as condutividades hidráulicas no entorno do lago (item 6.2.3.2).
- Comparando-se as campanhas, os gradientes em época de verão são menores que em época de inverno, confirmando a maior contribuição do lago no aquífero nesse período, devido à menor taxa de recarga nas zonas não impermeabilizadas e à maior diferença de potencial entre lago e aquífero (Tabela 6.3 e Figura 6.7).

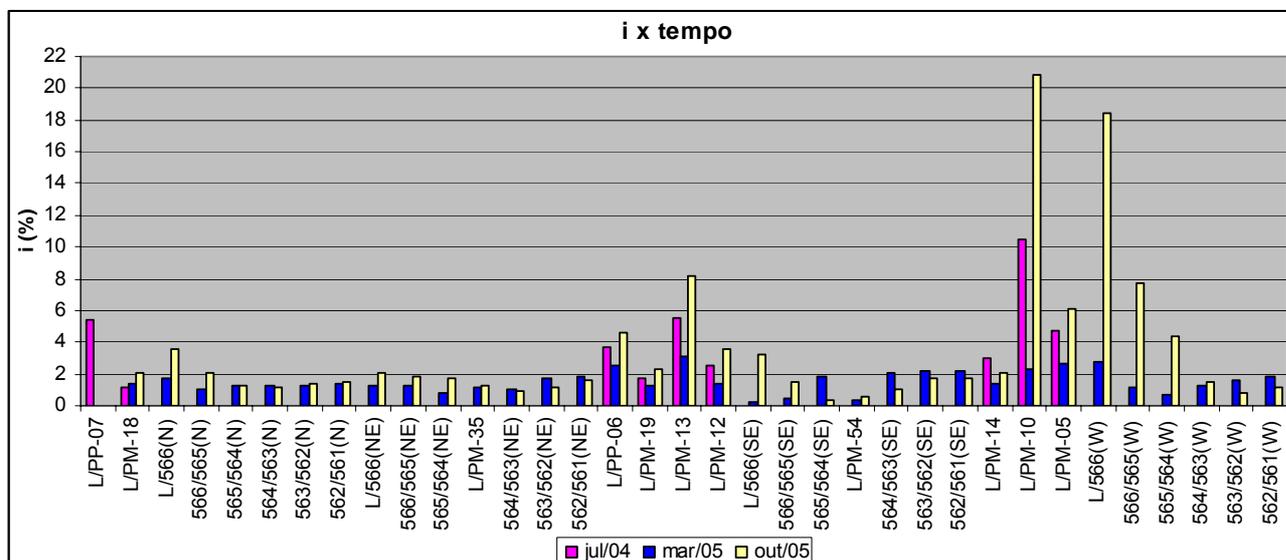
Tabela 6.3 – Comparação entre os gradientes hidráulicos e entre as campanhas de medição de nível.

Porção do lago	Pontos + próximos do lago	i (%) JUL/04	i (%) MAR/05	i (%) OUT/05	Pontos + distantes do lago	i (%) JUL/04	i (%) MAR/05	i (%) OUT/05
Norte (N)	Lago / PP-07	<b>5,46</b>	---x---	---x---	Lago / PM-18	<b>1,19</b>	<b>1,36</b>	<b>2,13</b>
	Lago / iso* 566	---x---	<b>1,77</b>	<b>3,58</b>	iso 564/iso 563	---x---	<b>1,25</b>	<b>1,15</b>
	iso 566/iso 565	---x---	<b>1,00</b>	<b>2,06</b>	iso 563/iso 562	---x---	<b>1,32</b>	<b>1,35</b>
	iso 565/iso 564	---x---	<b>1,32</b>	<b>1,27</b>	iso 562/iso 561	---x---	<b>1,42</b>	<b>1,44</b>
Nordeste (NE)	---x---	---x---	---x---	---x---	Lago / PM-35	---x---	<b>1,1</b>	<b>1,27</b>
	Lago / iso* 566	---x---	<b>1,3</b>	<b>2,10</b>	iso 564/iso 563	---x---	<b>0,98</b>	<b>0,88</b>
	iso 566/iso 565	---x---	<b>1,3</b>	<b>1,82</b>	iso 563/iso 562	---x---	<b>1,75</b>	<b>1,20</b>
	iso 565/iso 564	---x---	<b>0,86</b>	<b>1,71</b>	iso 562/iso 561	---x---	<b>1,90</b>	<b>1,56</b>
Leste (E)	Lago / PP-06	<b>3,68</b>	<b>2,51</b>	<b>4,63</b>	Lago / PM-19	<b>1,70</b>	<b>1,22</b>	<b>2,36</b>
Sudeste (SE)	Lago / PM-13	<b>5,50</b>	<b>3,07</b>	<b>8,13</b>	Lago / PM-12	<b>2,50</b>	<b>1,35</b>	<b>3,57</b>
	---x---	---x---	---x---	---x---	Lago / PM-54	---x---	<b>0,37</b>	<b>0,55</b>
	Lago / iso* 566	---x---	<b>0,25</b>	<b>3,27</b>	iso 564/iso 563	---x---	<b>2,06</b>	<b>1,04</b>
	iso 566/iso 565	---x---	<b>0,45</b>	<b>1,44</b>	iso 563/iso 562	---x---	<b>2,16</b>	<b>1,69</b>
Sul (S)	iso 565/iso 564	---x---	<b>1,89</b>	<b>0,29</b>	iso 562/iso 561	---x---	<b>2,23</b>	<b>1,75</b>
	---x---	---x---	---x---	---x---	Lago / PM-14	<b>2,98</b>	<b>1,42</b>	<b>2,04</b>
	---x---	---x---	---x---	---x---	Lago / PM-57	---x---	<b>0,064</b>	<b>0,51</b>
Oeste (W)	Lago / PM-10	<b>10,46</b>	<b>2,34</b>	<b>20,90</b>	Lago / PM-05	<b>4,70</b>	<b>2,69</b>	<b>6,15</b>
	Lago / iso* 566	---x---	<b>2,82</b>	<b>18,46</b>	iso 564/iso 563	---x---	<b>1,30</b>	<b>1,47</b>
	iso 566/iso 565	---x---	<b>1,14</b>	<b>7,77</b>	iso 563/iso 562	---x---	<b>1,60</b>	<b>0,77</b>
	iso 565/iso 564	---x---	<b>0,70</b>	<b>4,40</b>	iso 562/iso 561	---x---	<b>1,82</b>	<b>1,14</b>

\* iso = linha isopotencial = equipotencial (manm); i = gradiente hidráulico.

- Os menores gradientes na área localizam-se rumo sul, em direção ao PM-57 e sudeste, em direção ao PM-54, devido provavelmente à topografia plana e à ausência de áreas de descarga, como ocorrem rumo leste e oeste, onde há um maior gradiente hidráulico, devido à influência dos córregos. O baixo gradiente também pode ser devido à presença de material geológico mais permeável, como a descrita no PM-54 (item 6.2.3.2).

- Nota-se um relativo aumento dos gradientes aproximando-se dos córregos situados rumo leste e oeste da Área Fabril, pouco maiores em época de cheia.



\*L = Lago; 566 = equipotencial de 566manm.

Figura 6.7: Variação dos gradientes hidráulicos (i) ao longo do tempo.

A relação de influência do lago para o aquífero foi bem definida através das CH obtidas nos piezômetros PZ-02, PZ-03, PZ-04 e PZ-05, já que estes apresentam CH menores que a do lago (Figura 6.8). Os piezômetros PZ-02 e PZ-03 foram instalados em uma pequena área emersa do lago, com uma distância de 0,50m entre eles, com seções filtrantes de 1,00m posicionadas a profundidades distintas de 3,50 e 5,60m, enquanto os PZs 04 e 05 foram instalados dentro do lago, nas margens SE e N (Figura 5.1) respectivamente, com seções filtrantes de 1,00m posicionadas em 3,00m de profundidade (Tabela 6.4). Observa-se que há uma diferenciação entre as CH dos piezômetros e a CH do lago, sendo que a maior diferença foi observada no PZ-05, com média igual a 1,12m (Tabela 6.4), indicando maior gradiente vertical nessa porção do lago, igual a 37,3%, enquanto o gradiente vertical médio calculado para o PZ-04 foi de 23,7%, ambos em época de estiagem.

O gradiente vertical médio entre o lago e os PZs 02 e 03 foi calculado para o verão e para o inverno, já que as diferenças entre as CH apresentaram diferença considerável. Tal cálculo não foi aplicado para os PZs 04 e 05, devido ao afogamento desses poços pelo lago em época de cheia (verão). As diferenças de CH médias ( $\Delta H$ ) para o verão foram de 0,16m (PZ-02 e PZ-03) e para o inverno de 0,62m (PZ-02) e 0,64m (PZ-03) e os gradientes médios calculados foram respectivamente de 4,6% (PZ-02) e 2,8% (PZ-03) para o verão e de 17,7% (PZ-02) e 11,4% (PZ-03) para o inverno, indicando que o lago contribui verticalmente em maior proporção no inverno.

Tabela 6.4 – Relação entre cargas hidráulicas do lago e aquífero superficial.

Poço	Profundidade de Total (m)	Comprimento da Seção filtrante (m)	Cota do tubo/marco (m)	Carga Hidráulica OUT/04 (m)	Carga Hidráulica JAN/05 (m)	Carga Hidráulica MAR/05 (m)	Carga Hidráulica OUT/05 (m)
LAGO	-x-	-x-	566,59	566,11	566,81	566,79	566,34
PZ-02	3,50	1,00	566,97	565,30	566,70	566,60	565,90
PZ-03	5,60	1,00	566,86	565,29	566,69	566,59	565,88
PZ-04	3,00	1,00	566,76	565,26	---x---	---x---	565,77
PZ-05	3,00	1,00	566,74	564,94	---x---	---x---	565,25
PM-10	4,20	3,00	567,40	564,37	566,78	566,61	564,72
PM-10P	10,00	1,00	567,54	563,95	564,84	565,91	564,13
PM-01	7,50	2,00	569,52	563,14	---x---	565,19	563,04
PM-01P	14,60	1,00	569,57	563,14	564,82	565,19	563,04

---x--- não medido.

A CH do PZ-02 é pouco maior que a do PZ-03 (0,01m), indicando novamente fluxo vertical descendente, apesar do baixíssimo gradiente vertical igual a 0,5%. Tal característica é melhor observada através dos poços PM-10 e PM-10P instalados na margem oeste do lago (Figura 5.1), com seções filtrantes de 3,00m e 1,00m, a profundidades distintas de 4,20m e 10,00m respectivamente. As diferenças de CH médias ( $\Delta H$ ) entre esses poços também apresentaram diferenciação entre verão e inverno respectivamente de 1,30m e 0,50m, com gradientes hidráulicos verticais médios de 22,4% e 8,6%.

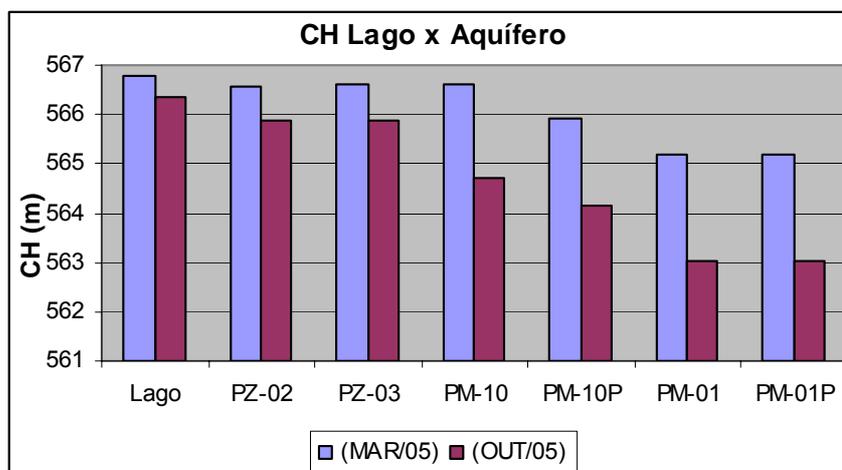


Figura 6.8: Comparação de cargas hidráulicas entre o lago, PZs e PMs.

Comparando-se o fluxo vertical entre os piezômetros e o lago e entre os PMs 10 e 10P localizados na margem do lago, nota-se a relação inversa entre verão e inverno, ou seja, enquanto o gradiente hidráulico vertical nos piezômetros é maior no inverno, nos poços é maior no verão. Tal fato pode ser explicado pela recarga nos piezômetros diretamente do lago, enquanto nos poços, além da contribuição do lago, ocorre recarga nas áreas não impermeabilizadas em maior proporção no verão. O maior comprimento da seção filtrante do PM-10 também pode ter influência nesse comportamento.

O fluxo vertical entre os poços PM-01 e PM-01P é nulo, indicando que estão fora da zona de recarga do lago, onde o fluxo subterrâneo é predominantemente horizontal.

Para uma melhor visualização do comportamento do aquífero ao longo do tempo, mapas de resíduo entre as diversas campanhas foram confeccionados através da diferença entre as cargas hidráulicas da campanha posterior e anterior (Figuras 6.9, 6.10, 6.11 e 6.12).

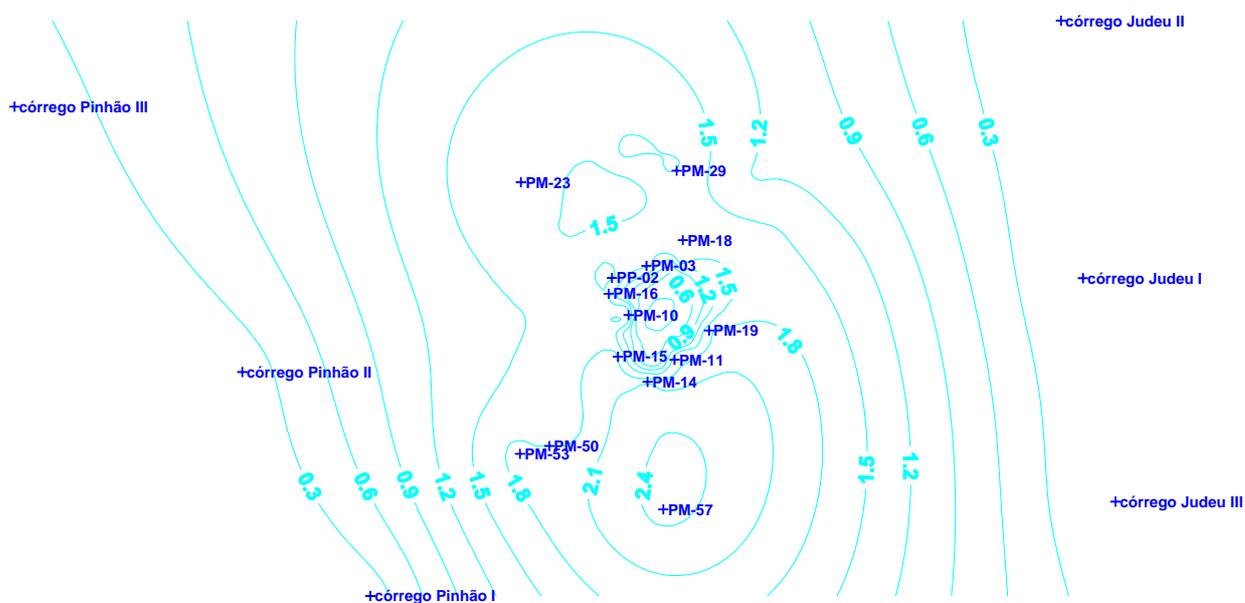


Figura 6.9: Resíduo entre as campanhas de janeiro de 2005 e outubro de 2004, em metros.

Entre as campanhas de janeiro de 2005 e outubro de 2004 (Figura 6.9) houve recarga em toda a área. A maior diferença de carga hidráulica ocorre no entorno próximo do lago e rumo sul do lago, diminuindo em direção aos córregos rumo leste e oeste, sendo a configuração deste mapa semelhante à dos mapas potenciométricos.

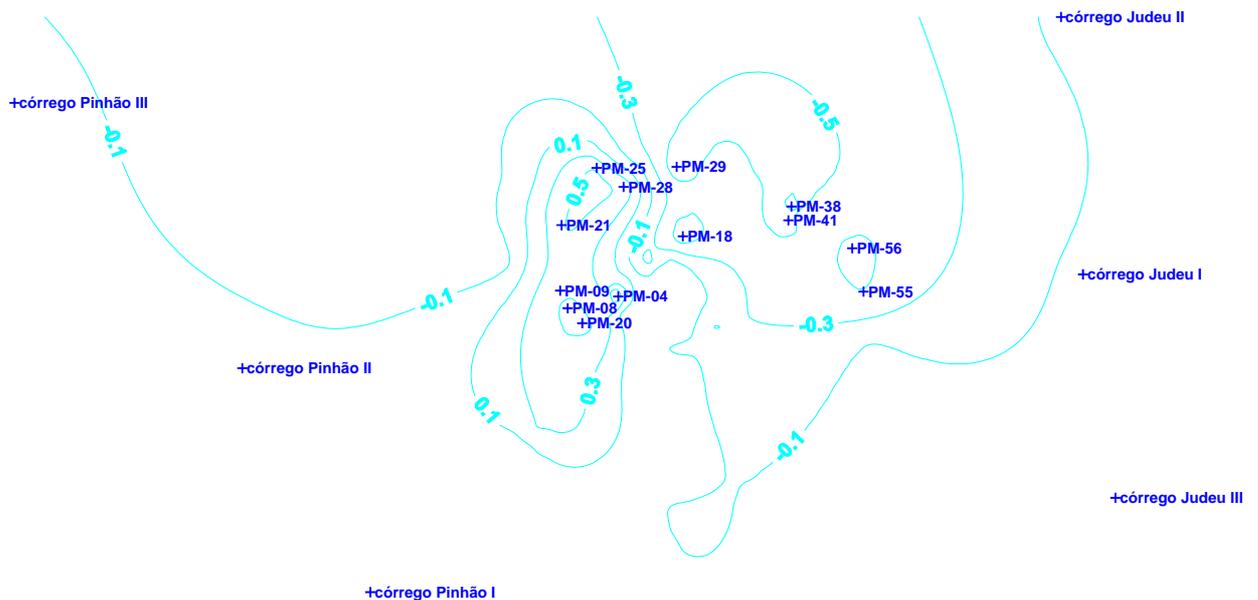


Figura 6.10: Resíduo entre as campanhas de março e janeiro de 2005.

Entre março de 2005 e janeiro de 2005 (Figura 6.10), ambas em época de cheia, nota-se que alguns poços possuem recarga mais imediata que outros, apresentando diferença de carga hidráulica negativa de até 0,90m (PM-18), localizados principalmente rumo NE/ SE, enquanto outros apresentam maior recarga em março, com diferença de carga positiva de até 0,94m (PM-04), localizados principalmente rumo NW / SW.

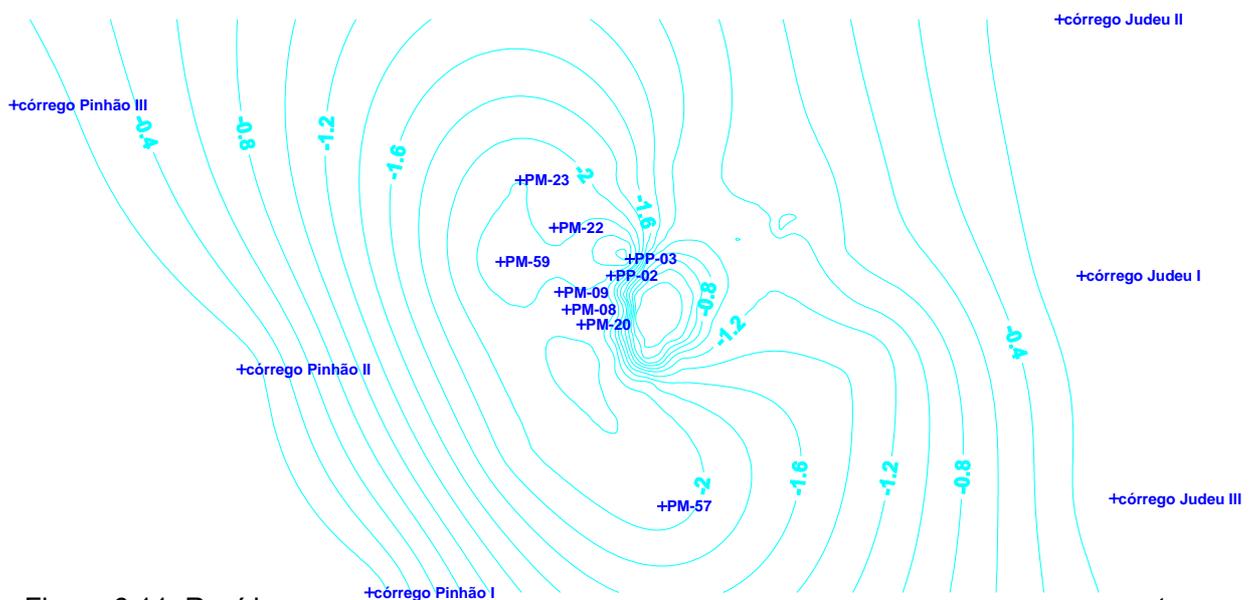


Figura 6.11: Resíduo entre as campanhas de outubro e março de 2005.

Entre outubro de 2005 e março de 2005 (Figura 6.11) observa-se um rebaixamento do nível de água em toda a área, com maior diferença de carga hidráulica (2,79m) no entorno próximo do lago (PP-03) e rumo NW / SW do lago (2,13m e 2,21m), diminuindo em direção aos córregos rumo leste e oeste.

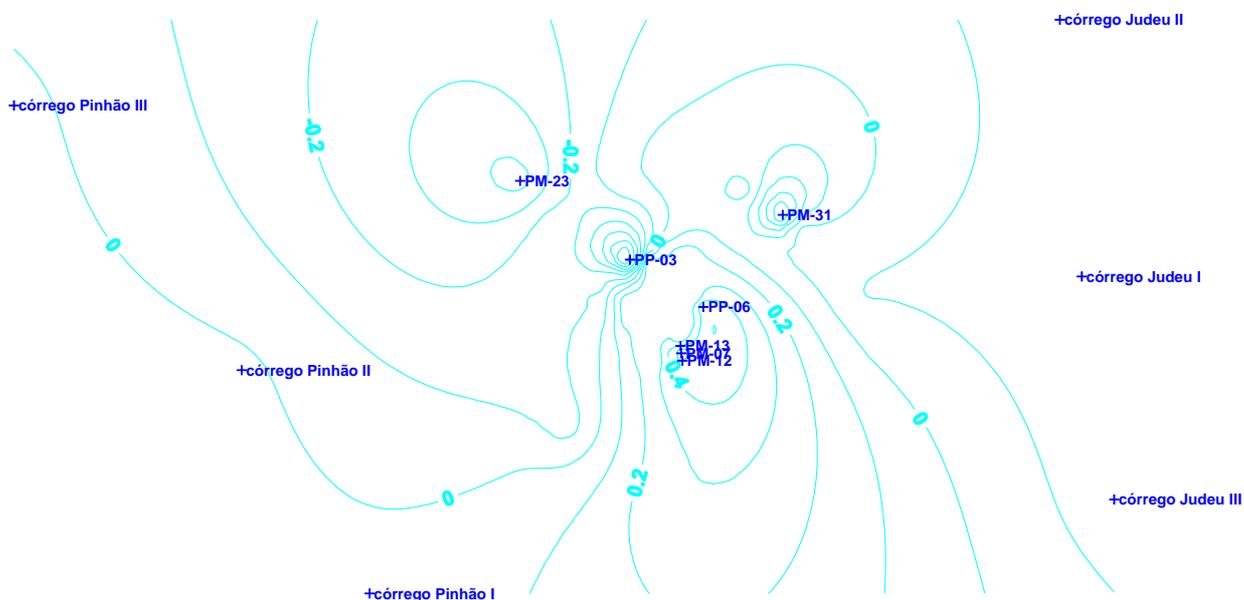


Figura 6.12: Resíduo entre as campanhas de outubro de 2005 e outubro de 2004.

Um mapa de resíduo entre outubro de 2005 e outubro de 2004 (Figura 6.12) foi confeccionado para visualizar as principais diferenças entre os anos no período de fim de estiagem (outubro), onde nota-se que as diferenças entre cargas são pouco significativas (entre 0 e  $\pm 0,2$ m), com exceção do entorno próximo ao lago, principalmente rumo SE (PM-07, PM-11, PM-12, PM-19 e PP-06), onde ocorrem diferenças de cargas de até 0,50m, indicando maior recarga no aquífero em outubro de 2005. Um rebaixamento máximo de 0,86m foi observado no PP-03, provavelmente devido ao material mais argiloso existente ao longo da seção filtrante, que pode estar retardando a maior recarga de outubro de 2005.

### 6.2.3. Cálculo da Velocidade da Água Subterrânea

#### 6.2.3.1. Ensaio de Amostras Indeformadas

As Tabelas 6.5 e 6.6 mostram os resultados dos parâmetros físicos analisados na amostra coletada no entorno do lago (TR-01), próxima aos PMs 10 e 10P (Figura 5.1). A amostra deformada é denominada de AD e a amostra indeformada é denominada de AI.

Tabela 6.5 – Resultados dos ensaios de granulometria e densidade do solo.

Amostra	Densidade de partículas (real) (g/cm <sup>3</sup> )	Argila (%)	Silte (%)	Areia Total (%)	Areia (%)					Cascalho (%)
					MG	G	M	F	MF	
AD-01	2,62	44	08	48	2	8	12	16	10	0

Tabela 6.6 – Resultados dos ensaios para parâmetros físicos do solo.

Amostra	Densidade do solo (aparente) (g/cm <sup>3</sup> )	Microporos ou poros <37,5µm		Porosidade total		Porosidade efetiva		Condutividade hidráulica saturada (cm/s)
		cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	%					
AI-01	1,46	0,364	0,429	0,065	0,065	0,429	42,9	8,0x10 <sup>-6</sup>

Observa-se que a granulometria da amostra condiz com a descrição de campo, sendo que o solo amostrado para tal análise foi o solo residual argilo-arenoso, segundo a classificação SHEPPARD (1954), para materiais inconsolidados.

Observa-se uma baixa porosidade efetiva igual a 6,5%, próxima à média de porosidade efetiva de argilas arenosas igual a 7%, segundo JOHNSON (1967).

#### 6.2.3.2. Ensaio de Condutividade Hidráulica Saturada

Durante o presente estudo, realizaram-se 20 ensaios de permeabilidade do tipo *slug test* com carga variável para a determinação da condutividade hidráulica (K) horizontal da zona saturada, no entorno do lago. Porém, dentre esses ensaios, apenas os realizados nos poços PM-03, PM-04, PM-07, PM-09, PM-12 e PM-19 obtiveram boas interpretações, ou seja, as medidas de variação de nível de água caíram sobre a curva do método utilizado para interpretação (Bouwer & Rice, 1976). Nota-se que as melhores curvas ajustadas estão relacionadas a materiais menos permeáveis.

Além dos ensaios efetuados nos poços do entorno do lago, outros *slug tests* foram executados em poços existentes na planta industrial (PM-29, PM-32, PM-38 e PM-46) durante o presente trabalho. Os resultados de ensaios realizados nos poços PM-54, PM-55, PM-56, PM-57 e PM-58 por outra empresa também serão interpretados (Tabela 6.7), porém as planilhas e

os gráficos da interpretação (Anexo IV) para esses poços não serão apresentados, devido à inacessibilidade desses dados.

Tabela 6.7 – Comparação entre os valores calculados da condutividade hidráulica (K) e o material geológico.

Poço	Valor de K (m/s)	Material geológico
PM-03	$5,84 \times 10^{-5}$	Argila siltosa
PM-04	$1,90 \times 10^{-6}$	Areia média a grossa (0,7m) Argila arenosa (1,3m)
PM-07	$8,12 \times 10^{-6}$	Argila siltosa com lentes dm. de areia média/grossa
PM-09	$1,70 \times 10^{-7}$	Argila arenosa (0,9m) Argila siltosa (2,4m)
PM-12	$2,82 \times 10^{-6}$	Argila arenosa (1,7m) Argila siltosa (1,9m)
PM-19	$1,74 \times 10^{-6}$	Argila arenosa (2,9m) Argila arenosa com lentes dm. de areia média/grossa (0,6m)
PM-58	$3,71 \times 10^{-6}$	Argila arenosa com lentes de areia média/grossa
PM-29	$1,08 \times 10^{-6}$	Argila siltosa
PM-32	$7,33 \times 10^{-6}$	Argila arenosa (1,2m) Areia fina a grossa (0,7m) Argila siltosa (0,4m)
PM-38	$5,20 \times 10^{-7}$	Argila arenosa (1,9m) Argila siltosa (0,3m)
PM-46	$5,99 \times 10^{-7}$	Argila arenosa (1,4m) Argila siltosa (0,5m)
PM-54	$7,30 \times 10^{-6}$	Argila arenosa com lentes dm. de areia média/grossa (1,0m) Areia média (4,0m)
PM-55	$1,08 \times 10^{-5}$	Argila arenosa lentes dm. de areia média/grossa (2,0m) Areia média (3,0m)
PM-56	$2,15 \times 10^{-5}$	Argila arenosa lentes dm. de areia média/grossa
PM-57	$8,31 \times 10^{-6}$	Argila arenosa lentes dm. de areia média/grossa

dm. – decimétricas

Se comparados os valores de condutividade hidráulica com o material geológico presente no entorno da coluna de água (Tabela 6.7), as seguintes observações podem ser tecidas:

- 1) O resultado de K do PM-03, apesar de ter se ajustado bem à curva, não condiz com o material presente ao longo da coluna de água (argila siltosa), se comparado a outro ensaio (PM-29), cujo material é semelhante. Portanto, tal resultado foi desconsiderado.
- 2) No entorno do lago, os valores de K não variam muito ( $1,70 \times 10^{-6}$  m/s a  $8,10 \times 10^{-6}$  m/s), com uma única exceção do PM-09, cujo valor apresenta-se uma ordem de grandeza inferior ( $1,70 \times 10^{-7}$  m/s). Nota-se que dentro da ordem de grandeza  $10^{-6}$ , o valor mais alto está relacionado com a presença de lentes decimétricas de areia média a grossa, mesmo sendo a matriz uma argila siltosa (PM-07).

- 3) Os resultados de K nos quatro poços fora da área do lago apresentaram variação na mesma ordem de grandeza que os poços do entorno do lago ( $10^{-6}$  a  $10^{-7}$ m/s) e bem correlacionados com os materiais geológicos descritos. O maior valor observado ( $7,33 \times 10^{-6}$ m/s) está relacionado com a presença de uma lente quase métrica (0,70m) de areia fina a grossa, enquanto os menores valores observados estão relacionados com a presença de argila siltosa.
- 4) Os resultados de K obtidos em outro trabalho apresentaram os menores valores de K ( $7,30 \times 10^{-6}$ m/s e  $1,08 \times 10^{-5}$ m/s), devido à presença de camadas de areia no perfil localizadas em maiores profundidades (9,0 a 12,0m) e às localizações bem diferenciadas (Figura 6.4) desses poços. O resultado do ensaio realizado no PM-56 foi desconsiderado, pois é muito alta para o material descrito. O resultado do PM-57 é condizente com o material descrito, semelhante àquele existente no perfil do PM-07, que tem K parecido ( $8,12 \times 10^{-6}$  m/s).
- 5) Dentro da área da fábrica, os valores de K variam duas ordens de grandeza ( $10^{-5}$  a  $10^{-7}$ m/s), sendo esses valores condizentes com o material existente no substrato, ressaltando a heterogeneidade do aquífero.

Observa-se que K da amostra AI-01 obtida em ensaio de laboratório (Ensaio de Condutividade Hidráulica Saturada, IPT), igual a  $8,00 \times 10^{-8}$ m/s, está distante dos intervalos de grandeza obtidos com ensaios *in situ* tipo *slug test* ( $10^{-5}$  a  $10^{-7}$ m/s). Tal fato pode ser explicado pelas seguintes afirmativas:

- a condutividade medida na amostra indeformada, condutividade hidráulica vertical, é normalmente menor em uma ordem de grandeza que a condutividade horizontal;
- a amostragem indeformada é pontual, não abrangendo a heterogeneidade da composição do material geológico do aquífero; e
- por ser pontual, a amostragem indeformada não atinge as porções onde há lentes decimétricas de areia que colaboram para maiores valores de K, como ocorre ao longo da seção filtrante de alguns poços, como por exemplo, os PMs 07, 19, 56, 57 e 58.

#### **6.2.3.3. Velocidade da Água Subterrânea**

A velocidade da água subterrânea foi calculada para cada campanha de amostragem (julho de 2004, março de 2005 e outubro de 2005) e para a campanha de medição de nível de outubro de 2004 (Anexo V), com base na Lei de Darcy.

A porosidade efetiva utilizada ( $\eta_e = 6,5\%$ ) foi aquela obtida em análise com duplicata realizada em amostra indeformada retirada em local à aproximadamente 7,0m da margem oeste do lago. As condutividades hidráulicas consideradas nos pontos onde não há valores calculados por *slug tests* foram aquelas cujo material geológico era semelhante àqueles onde

os valores foram calculados (Tabela 6.7), como por exemplo, PM-05, PM-10 e P-13. Se mais de um valor de K foi obtido em uma mesma área de cálculo de velocidade, calculou-se uma média entre as medidas, como no caso da porção NE, onde há três valores (PM-32, PM-38 e PM-46), como no caso da porção SE (PM-07, PM-12 e PM-54) e da porção W (PM-04, PM-58 e PM-09).

As maiores velocidades de fluxo da água subterrânea estão no entorno próximo ao lago, diminuindo com o aumento de sua distância, até que começa a aumentar novamente, devido à influência dos córregos rumo leste e oeste, porém as maiores velocidades observadas em direção aos córregos são bem inferiores às observadas no entorno próximo ao lago (Tabela 6.8).

Tabela 6.8 – Velocidades de fluxo subterrâneo.

Velocidade (m/ano)	JUL/04	OUT/04	MAR/05	OUT/05
<b>V mín.</b>	3,26 (PP-01 / PM-08)	0,38 (PM-01 / PM-09)	0,19 (PP-01 / PM-09)	1,27 (PM-01 / PM-09)
<b>V máx.</b>	216,68 (Lago / PM-13)	479,45 (Lago / PM-13)	120,94 (Lago / PM-13)	320,29 (Lago / PM-13)
<b>V média</b>	60,62	56,74	22,65	51,95
<b>V média em direção aos córregos</b>	---x---	14,11	19,49	15,22

Apesar de os maiores gradientes hidráulicos localizarem-se na porção W (Lago / PM-10), verificam-se as maiores velocidades na porção SE do entorno próximo ao lago (Lago / PM-13), devido à maior condutividade hidráulica adotada. As menores velocidades localizam-se a aproximadamente 120m do lago rumo NW (PM-01 a PM-09).

Comparando-se as campanhas de julho e outubro de 2004, nota-se que houve um aumento de quase o dobro nas velocidades em consequência do aumento dos gradientes devido à maior diferença de potencial hidráulico entre o lago e o aquífero no fim da época de estiagem.

As velocidades na época de cheia (março de 2005) são menores que em época de estiagem, bem como a diferença entre as velocidades observadas em direção aos córregos e as médias observadas dentro da Área Fabril. Entre as campanhas de outubro de 2004 e março de 2005, houve uma diminuição de aproximadamente quatro vezes nas velocidades, devido à pequena diferença de potencial hidráulico entre o lago e o aquífero em época de cheia. Uma redução da velocidade de aproximadamente 10 vezes ocorreu na porção W entre o lago e o PM-10, onde ocorre a segunda maior velocidade em época de estiagem, ficando próxima às velocidades calculadas para a porção N no entorno próximo ao lago na época de cheia (Anexo V).

### **6.3. CARACTERIZAÇÃO DO MEIO POROSO**

#### **6.3.1. Descrição Visual do Material de Perfuração**

O perfil litológico característico definido pelas observações realizadas durante as sondagens e instalação dos poços de monitoramento (vide localização Figura 5.1), cujas descrições litológicas estão disponibilizadas no Anexo I, é representado do topo para a base por:

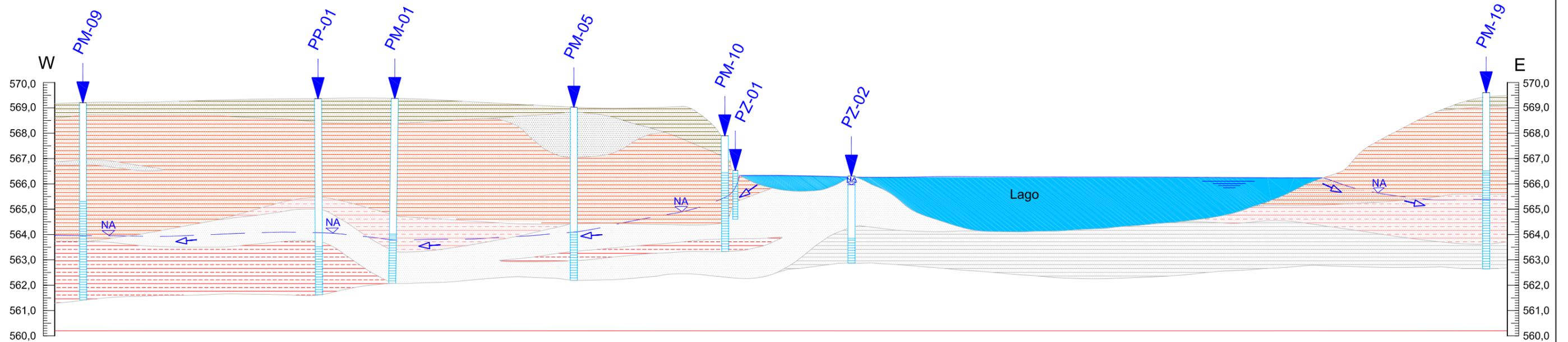
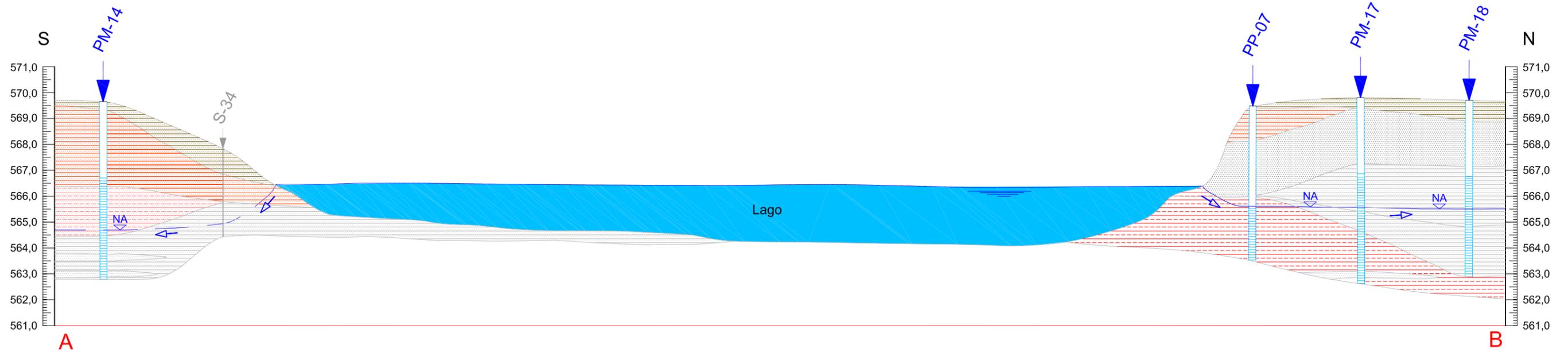
- Aterro composto predominantemente por solo argilo-arenoso a areno-argiloso, por vezes siltoso, pouco compacto, marrom avermelhado. Em algumas porções da fábrica, observou-se também aterro de areia de fundição com pedaços de metal e britas decimétricas, areia predominantemente grossa e preta, apresentando odor químico indefinido. A profundidade dessas ocorrências varia entre 1,0 e 5,0m.
- Solo de alteração composto predominantemente por argila arenosa a siltosa, de coloração predominantemente alaranjada, apresentando porções variegadas (vermelhas e creme com pigmentos brancos/cinzas/ocres e beges), pouco compacto, com presença de grânulos de quartzo (milimétricos e centimétricos) muito angulosos a subarredondados e de argila esparsos na matriz. Esses solos atingem profundidades entre 2,5m e 6,5m.
- Argila arenosa compacta, com grânulos e seixos de quartzo subarredondados a angulosos esparsos na matriz. Tal litotipo apresenta intercalações decimétricas de areia argilosa e areia média a muito grossa cinza e laranja avermelhada. Em algumas porções da fábrica, há ocorrências de camadas arenosas com argila, friáveis, de granulometria média a grossa, predominantemente grossa. Em outros setores, tal horizonte corresponde a uma argila siltosa compacta a muito compacta, cinza ou variegada (cinza e vermelha). Esses litotipos podem ocorrer a profundidades de até 20m.

Estas intercalações de camadas arenosas e argilosas são típicas de sistemas deposicionais fluviais, podendo ser visualizadas nas seções geológicas A-B e C-D (Figura 6.13). Tais unidades litoestratigráficas são caracteristicamente sedimentos terciários pertencentes ao Grupo Taubaté, Formação Tremembé (IPT, 1978) e ao Sistema Fluvial Meandrante da Sequência Pindamonhangaba (IPT, 1990).

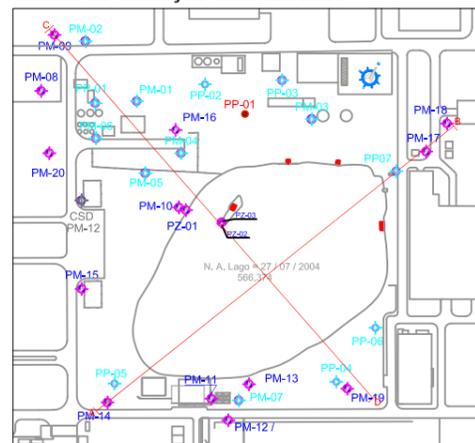
##### **6.3.1.1. Sedimento de Fundo da Lagoa e Solo Subjacente**

Durante as amostragens de sedimento de fundo do lago e solo subjacente, observou-se que o sedimento de fundo do lago é uma lama predominantemente argilosa, com muita matéria orgânica (Lago N, Lago NE, Lago E e Lago SE), com exceção da porção W do lago (Lago W),

que apresentou reduzida espessura de sedimento de fundo (0,3 a 0,6m) composto predominantemente por areia siltosa. O solo subjacente pertencente ao aquífero é argilo-arenoso com grânulos e seixos de quartzo subarredondados a angulosos esparsos na matriz, cinza claro, com forte odor de matéria orgânica, correlacionado com a terceira camada do perfil litológico descrito acima (Anexo I).



Planta de Situação Sem Escala



Legenda de Solo:

- Aterro de solo areno argiloso, por vezes arenoso (areia mal selecionada) com argila, friável a moderadamente compacto, com raízes e britas, predominantemente marrom, secundariamente laranja, marrom alaranjado, preto e marrom escuro.
- Aterro de solo argilo-arenoso com silte (areia fina a grossa), pouco compacto a compacto. Observa-se grânulos de quartzo esparsos, muito angulosos a subarredondados e pedriscos de quartzo e argila. Em porções pouco profundas, pode apresentar raízes e britas. Coloração predominante laranja ou laranja/ocre, laranja avermelhado e marrom alaranjado.
- Camada de areia de fundição composta por areia fina a grossa, predominante grossa, com argila, friável a mole, por vezes com matéria orgânica, de coloração preta e cinza escura, apresentando britas centimétricas a decimétricas, pedaços de vidro, metal e borraça; escória de fundição.
- Argila silto arenosa (areia fina a muito fina), pouco compacta a compacta, com grânulos de quartzo esparsos, angulosos a subarredondados, predominantemente vermelha, com pigmentos ocre, róseos, beges e brancos (variegada). Pode-se apresentar também alaranjada e castanha acinzentada.
- Argila arenosa, compacta a mole, com intercalações centimétricas de areia mal selecionada, por vezes cascalhosa, com grânulos e até seixos centimétricos de quartzo esparsos na matriz, subarredondados a angulosos, com coloração cinza clara e bege.
- Areia fina a muito grossa, mal selecionada, com grãos subangulosos a subarredondados, por vezes silto e/ou argilosa, friável, com grânulos e seixos angulosos a subarredondados, predominantemente cinza clara, secundariamente bege, laranja e amarela.
- Argila silto arenosa, compacta a muito compacta, apresenta em algumas porções, intercalações centimétricas de areia mal selecionada (fina a grossa) argilosa a silto, predominantemente cinza clara e vermelha com pigmentos cinza, branco, ocre e bege.

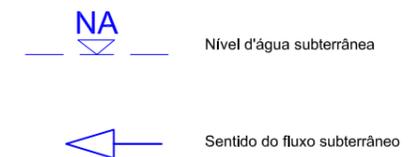


FIGURA 6.13 Seções geológicas A-B e C-D

Local Parque das Indústrias Taubaté, Brasil

Projeto Tese de Mestrado

Data : 26/07/2008	Doc. ref.: Tese de Mestrado	Edição : 01	Arquivo : Fig.6.13 - Seções Geológicas A-B e C-D	Desenho : Tereza
-------------------	-----------------------------	-------------	--	------------------

## **6.3.2. Caracterização Textural do Solo e Sedimento de Fundo**

### **6.3.2.1. Ensaio de Granulometria**

Os resultados das análises granulométricas em porcentagem das faixas granulométricas são apresentados no Anexo VI. A localização das amostras coletadas pode ser visualizada na Figura 5.1.

O controle dos resultados das análises granulométricas é realizado através de um fator de correção que é a razão entre as massas totais inicial e final, que deve ser igual a  $1,0 \pm 0,05$ . Das 18 amostras analisadas, considerou-se somente os resultados de 14 delas. Dentre as 14 amostras, 11 apresentaram fatores de correção no intervalo estipulado, sendo que três delas, S-46 (1,8-2,2m, 04/05), S-47 (1,1-1,5m, 04/05) e Sed W (1,4-1,7m, 10/05) foram tratadas com reserva, já que os resultados do fator de correção encontram-se ligeiramente fora do intervalo especificado (1,07, 1,17 e 0,91, respectivamente). É válido lembrar que os valores acima do intervalo considerado indicam que a massa final é menor que a inicial, sugerindo perda de material. Quando o valor do fator de correção é inferior ao intervalo considerado, há a possibilidade de ganho de material durante o peneiramento e à não remoção total da fração de argila durante o preparo da mesma.

A Tabela 6.9 apresenta os resultados das análises granulométricas comparados à classificação de SHEPPARD (1954).

Os resultados das análises granulométricas combinam com a descrição de campo das sondagens (S-45, S-46 e S-47), bem como a análise realizada para os parâmetros físicos do solo na amostra TR-01, coletada próximo a ponto S-47. Observa-se que os horizontes mais superficiais das amostras S-46 e S-47 têm composição semelhante (argila arenosa), material correlacionável ao segundo litotipo descrito no item 6.3.1, enquanto que a amostra mais profunda da amostra S-47, também classificada como argila arenosa, apresenta porcentagem de argila relativamente maior, sendo melhor correlacionada com o terceiro litotipo descrito no item 6.3.1. A diferença na textura da amostra S-45 deve-se à presença da areia de fundição no substrato sobreposto ao material amostrado (Anexo I).

Tabela 6.9 – Resultados das análises granulométricas das amostras de solo, sedimento de fundo e solo subjacente.

Amostra*	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Classificação de SHEPPARD
S-45 (1,7-1,9m) 04/05	20,1	24,0	55,8	Areia Siltica
S-46 (1,8-2,2m) 04/05	49,9	6,5	43,6	Argila Arenosa
S-47 (1,1-1,5m) 04/05	47,7	6,0	46,3	Argila Arenosa a Areia Argilosa
S-47 (3,4-3,5m) 10/05	60,7	11,4	27,5	Argila Arenosa
Sed N (3,5-3,9m) 04/05	11,7	21,0	37,0	sem classificação (30,3% de grânulos)
Sed N (3,0-3,5m) 10/05	14,8	40,5	43,5	Areia Siltica
S Sub N (3,9-4,1m) 04/05	12,9	37,9	48,8	Areia Siltica
S Sub N (3,5-3,8m) 10/05	47,7	9,4	42,7	Argila Arenosa
Sed SE (1,8-2,1m) 04/05	35,8	22,7	41,4	Areia Argilosa
Sed SE (1,2-1,5m) 10/05	24,0	20,7	54,9	Areia Argilosa
S Sub SE (2,1-2,4m) 04/05	23,0	27,9	49,0	Areia Siltica
S Sub SE (1,5-1,9m) 10/05	34,6	10,8	54,3	Areia Argilosa
Sed W (2,3-2,5m) 04/05	29,0	27,0	44,0	Areia Siltica Argilosa
Sed W (1,4-1,7m) 10/05	0,7	38,7	60,3	Areia Siltica
S Sub W (1,7-2,1m) 10/05	51,0	5,6	43,4	Argila Arenosa

\* S-45 - denominação da amostra, S - sondagem, Sed - sedimento de fundo e S Sub - solo subjacente ao sedimento; N, SE e W - pontos de amostragem no lago; (1,7 - 1,9) - intervalo amostrado e 04/05 - data de amostragem.

Correlacionando a textura do material do aquífero amostrado durante as sondagens com o solo subjacente ao sedimento de fundo, nota-se uma diferenciação no material do aquífero entre as amostras S Sub N (3,5-3,8m de 10/05) e S Sub W (1,7-2,1m de 10/05) de composição argilo arenosa semelhante ao material das sondagens, com a amostra S Sub SE (2,1-2,4m de 04/05) de composição arenosa siltica, tal comportamento deve-se à própria heterogeneidade do material do aquífero. As demais amostras de solo subjacente [S Sub N (3,9-4,1m de 04/05) e S Sub SE (1,5-1,9m de 10/05)] devem ser avaliadas com precaução, pois têm a mesma composição que o sedimento de fundo, podendo ser resultantes da mistura dos materiais no *liner*.

Quanto aos sedimentos de fundo, nota-se que a predominância de argila esperada não coincide com os resultados granulométricos que variaram entre areia siltica e areia argilosa, com exceção da porção W do lago, onde há predominância de areia siltosa como observado em campo. Tal composição do material predominante do sedimento de fundo deve-se provavelmente à disposição de areia de fundição no fundo do lago.

### **6.3.3. Caracterização Química do Solo e Sedimento de Fundo**

#### **6.3.3.1. Análises Mineralógicas**

Os resultados das análises por difração de raio X (DRX) são apresentados nos difratogramas constantes no Anexo VII. Os difratogramas têm perfis muito parecidos, demonstrando que a mineralogia básica das amostras de solo e sedimento de fundo é semelhante. Todas as amostras de solo e sedimento de fundo total indicaram a ocorrência de quartzo (referência da biblioteca: 46-1045), caulinita (referência da biblioteca: 14-0164), gibbsita (referência da biblioteca: 33-0018) e algum aluminossilicato do grupo das micas (referência da biblioteca: 43-0685). Nota-se que as amostras Sed N (3,5-3,9m de 04/05) e Sed N (3,0-3,5m de 10/05) apresentam menor razão entre os picos de quartzo e os minerais de contagem baixa, o que significa menor proporção de quartzo em relação aos outros minerais. Devido à menor razão entre os picos, pôde-se observar a presença de um argilomineral da faixa de 15Å podendo ser do grupo da clorita ou da esmectita, porém, a análise *in natura* realizada neste estudo é insuficiente para a distinção entre os grupos de argilominerais, possível somente através de duas etapas adicionais de preparação das amostras (glicolada e aquecida). Além disso, os picos do quartzo apresentam-se bastante pronunciados, mascarando a eventual presença de outros minerais que ocorrem na fração argila, destacando a necessidade de análises nessa fração. Portanto, os resultados obtidos são apenas indicativos da mineralogia básica do solo.

No entanto, correlacionando os resultados mineralógicos com a bibliografia, nota-se que ambos os materiais (sedimento de fundo e solo do aquífero) tem potencial de adsorção do boro, devido à presença da caulinita e da gibbsita (SIMS & BINGHAM, 1967; SIMS & BINGHAM, 1968; GOLDBERG & GLAUBIG, 1985; GOLDBERG & GLAUBIG, 1986a; GOLDBERG *et al.*, 1993), em especial as amostras Sed N (3,5-3,9m de 04/05) e Sed N (3,0-3,5m de 10/05), que apresentaram menor proporção de quartzo em relação a esses minerais.

#### **6.3.3.2. Boro (ICP-AES)**

Os resultados das análises químicas de solo e sedimento de fundo para o boro são apresentados na Tabela 6.10, com exceção das amostras de solo coletadas durante as sondagens realizadas em julho de 2004 (Anexo II), cujos valores foram todos inferiores ao limite de detecção do laboratório (0,5mg/kg), demonstrando que o boro não é um elemento natural dos sedimentos que compõe o aquífero. A reprodutibilidade dos resultados é realizada e reportada pelo laboratório que utiliza soluções padrões de concentrações conhecidas denominadas de *spike* e *surrogate*. Os resultados são apresentados em porcentagem de recuperação de cada parâmetro e *surrogate* analisado. A faixa aceitável de recuperação segundo o laboratório é de 70 - 130%, em concordância com HOUNSLOW (1994), que

considera uma recuperação aceitável acima de 70%. Os resultados obtidos indicaram um percentual de recuperação entre 79% e 125%. A localização das amostras coletadas pode ser visualizada na Figura 5.1.

A Figura 6.14 mostra os resultados de boro no solo/sedimento de fundo ao longo do tempo, podendo-se observar que no geral, houve uma redução significativa das concentrações entre a primeira campanha realizada em julho de 2003, período logo após o cessar da fonte da primária (maio de 2003), e as demais campanhas realizadas a partir de um ano de intervalo (julho de 2004, março de 2005 e outubro de 2005), com exceção das amostras da porção W do lago (Sed W e SSub W) que apresentaram relativo aumento de concentração na última campanha. O mesmo gráfico demonstra também maiores concentrações de boro no sedimento de fundo (Sed N, Sed SE e Sed W) do que no aquífero (SSub N, SSub SE, SSub W, S-45, S-46 e S-47). Observa-se também um relativo aumento das concentrações de boro nas amostras das sondagens (S-45 e S-46) na última campanha, indicando maior adsorção do boro no aquífero. Nota-se que o comportamento das concentrações de boro no sedimento de fundo e no solo do aquífero apresenta-se relativamente homogêneo nas três últimas campanhas, devido ao cessar da fonte e provavelmente à saturação dos sítios de adsorção do boro.

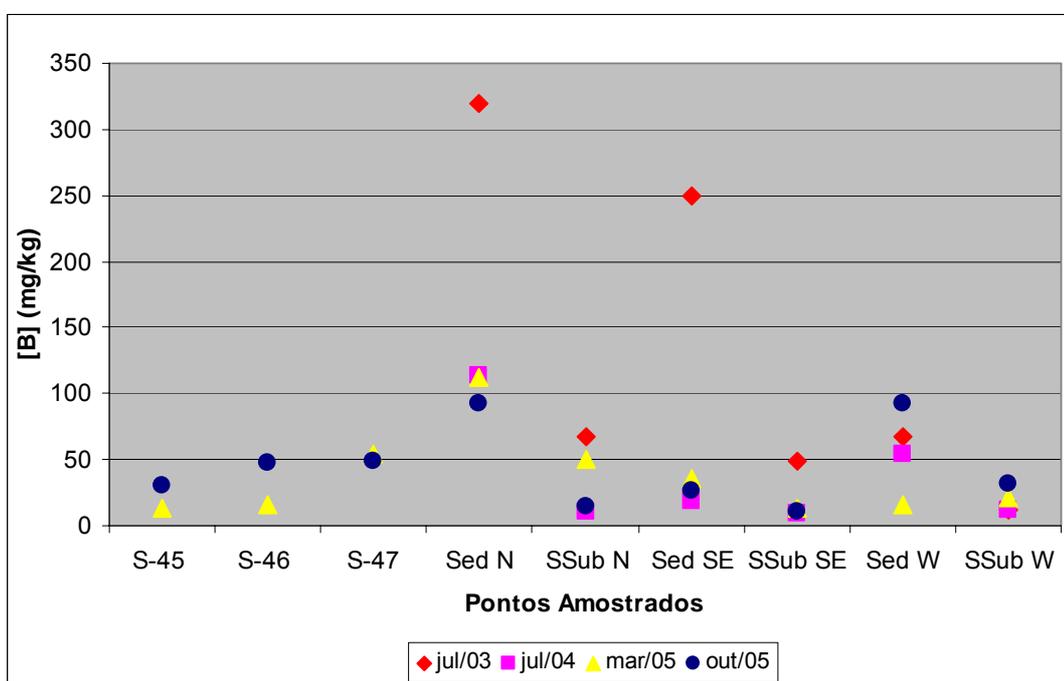


Figura 6.14: Concentração de boro no solo e sedimento de fundo ao longo do tempo.

Tabela 6.10 – Resultados das análises químicas do solo e sedimento de fundo.

Parâmetro	Data de amostragem	Boro Total	Boro removível	pH CaCl <sub>2</sub>	M.O.	CTC	
Unidade	--x--	mg/kg	mg/kg	--x--	%	meq/100g	
Identificação das Amostras	S-45 (1,7-1,9m)	Mar/05	13,4	0,30	6,5	1,5	2,87
	S-45 (1,7-1,9m)	Oct/05	31,0	0,30	6,5	2,0	2,91
	S-46 (2,0-2,5m)	Mar/05	15,6	0,22	4,5	0,9	2,70
	S-46 (1,8-2,2m)	Oct/05	47,0	0,17	4,5	0,9	3,09
	S-47 (1,1-1,5m)	Mar/05	53,5	0,17	5,1	0,7	2,00
	S-47 (3,4-3,5m)	Oct/05	49,0	0,39	4,6	2,6	3,78
	Sed NE	Jul/04	114,0	na	na	na	na
	Solo Sub NE (0,5m)		10,9	na	na	na	na
	Sed P-NW	Jul/03	200,0	na	na	na	na
	Solo P-NW (0,5m)		40,0	na	na	na	na
	Sed N	Jul/04	41,0	na	na	na	na
	Solo Sub N (0,6m)		5,8	na	na	na	na
	Sed N (3,5-3,9m)	Mar/05	112,0	0,35	4,3	7,4	5,57
	Solo Sub N (3,9-4,1m)		49,8	0,52	5,0	1,1	6,96
	Sed N (3,0-3,5m)	Oct/05	92,0	0,43	5,3	1,2	6,04
	Solo Sub N (3,5-3,8m)		14,0	0,22	5,5	3,4	2,04
	Sed P-NE	Jul/03	320,0	na	na	na	na
	Solo Sub P-NE (0,5m)		67,0	na	na	na	na
	Sed E	Jul/04	16,8	na	na	na	na
	Solo Sub E (0,6m)		8,4	na	na	na	na
	Sed P-SE	Jul/03	250,0	na	na	na	na
	Solo Sub P-SE (0,5m)		49,0	na	na	na	na
	Sed SE	Jul/04	19,1	na	na	na	na
	Solo Sub SE (0,6m)		8,8	na	na	na	na
	Sed SE (1,8-2,1m)	Mar/05	35,7	0,30	5,5	2,0	4,39
	Solo Sub SE (2,1-2,4m)		13,8	0,22	5,6	4,5	3,43
	Sed SE (1,2-1,5m)	Oct/05	26,0	0,26	5,1	0,9	4,22
	SoloSub SE (1,5-1,9m)		11,0	0,26	5,8	2,7	1,83
	Sed P-SW	Jul/03	68,0	na	na	na	na
	Solo P-SW (0,5m)		<13	na	na	na	na
Sed W	Jul/04	54,0	na	na	na	na	
Solo Sub W (0,6m)		11,3	na	na	na	na	
Sed W (2,3-2,5m)	Mar/05	15,5	0,26	5,0	1,2	4,13	
SoloSub W (2,5-2,9m)		21,4	0,35	5,0	7,2	2,30	
Sed W (1,4-1,7m)	Oct/05	92,0	0,43	5,5	0,6	4,70	
SoloSub W (1,7-1,9m)		32,0	0,26	4,5	2,7	3,39	

S - sondagem; Sed - sedimento de fundo; Solo Sub - solo subjacente ao sedimento de fundo; na - não analisado.



Confrontando os resultados químicos de boro com os resultados granulométricos e mineralógicos tem-se que o B é mais adsorvido no sedimento de fundo, que contém menor porcentagem de argila que o solo do aquífero. Tal fato pode ser explicado pela presença do hidróxido de alumínio (gibbsita) cobrindo o material silicático composto predominantemente por quartzo, como descrito na bibliografia consultada (GOLDBERG *et al.*, 1993; MARZADOORI *et al.*, 1991 e SIMS & BINGHAM, 1967), ou mesmo pela presença de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio na fração grossa. Essas relações podem ser melhor caracterizadas com análises químicas qualitativas por Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e separação de pesados.

#### **6.3.3.3. pH, M.O. e CTC**

Os resultados das análises de pH, M.O. e CTC estão mostrados na Tabela 6.10 e no Anexo VIII. Os parâmetros boro removível e todos os cátions base formadores da CTC (K, Ca, Mg, Al e H) foram apresentados pelo laboratório em unidade/volume, sendo convertidos em unidade/massa, dividindo-se os valores por uma densidade total de  $2,3\text{g/cm}^3$  quantificada na amostra Sed W (2,3-2,5m de 04/05) e próxima à densidade do quartzo ( $2,6\text{g/cm}^3$ ), mineral presente em grandes proporções em todas as amostras de solo, como já demonstrado no item 6.2.3.1.

Os resultados de controle de qualidade das análises não foram disponibilizados, porém, os laudos analíticos possuem o selo de qualidade do Programa de Qualidade de Análise do Solo realizado pelo IAC (Instituto Agrônomo de Campinas), certificando que as análises são exatas e precisas.

Quanto aos resultados químicos, observa-se que as concentrações de boro removível do solo, ou seja, a porcentagem do boro adsorvido que pode ser removido pelas plantas, é muito pequena em relação às concentrações totais de boro. Segundo GUPTA, 1968 (apud GUPTA *et al.*, 1985), menos de 5% do total de boro no solo é disponível para absorção das raízes da plantas, corroborando as baixas concentrações encontradas de boro removível.

As maiores concentrações de boro total ocorrem na porção norte do lago (NW, N e NE), devido provavelmente ao evento de descarte de óleo solúvel nessa porção (item 6.1.1) e às maiores profundidades observadas no ponto de amostragem N, onde a camada de sedimento de fundo é mais espessa, havendo portanto, maior quantidade de materiais adsorventes do boro. Esses sedimentos (Sed N) possuem pH ácido, conteúdo de matéria orgânica baixo a alto (M.O.<2,2% a M.O.>2,6%) e CTC médio a alto ( $8,1 < \text{CTC} < 15 \text{meq}/100\text{mL}$  a  $\text{CTC} > 15 \text{meq}/100\text{mL}$ ). O fato de o boro total se apresentar em maiores concentrações em sedimentos cujo pH é ácido, está em discordância com toda bibliografia referenciada, o que leva a concluir que há outro mecanismo interferindo na adsorção do boro, como discutido a seguir (item 6.4.4).

No geral, a CTC das amostras de solo do aquífero é relativamente menor em comparação às amostras do sedimento de fundo, com exceção da amostra SSub N (3,9-4,1), que como citado no item 6.3.2.1, deve ser interpretada com ressalvas, devido à semelhança textural entre ela e o sedimento de fundo. Dentre os cátions que compõe o CTC, o que se apresenta mais adsorvido é o cálcio. A presença do argilo-mineral caulinita detectado na DRX, implica nos menores valores de CTC observados nas amostras (1,8 a 7,0meq/100g).

A Tabela 6.11 apresenta a matriz de correlação entre os resultados químicos do solo e as análises granulométricas, da qual se destacam as seguintes conclusões:

1) correlação positiva entre a CTC e os íons trocáveis Ca e Mg, indicando que esses íons são os mais adsorvidos, enquanto os outros cátions (K, Al e H) estão preferencialmente em solução ou precipitados;

2) correlação negativa entre o pH  $\text{CaCl}_2$  e o cátion Al, situação esperada, já que quanto maior o pH, maior a precipitação de hidróxidos de alumínio, no caso, a gibbsita na forma cristalina;

3) correlação positiva entre conteúdo de matéria orgânica e somente o cátion Al, indicando que possivelmente a matéria orgânica não é o principal material adsorvente;

4) correlação positiva entre a concentração de boro total e removível com o CTC, apesar de a forma de ocorrência do boro no meio ser aniônica ( $\text{B}(\text{OH})_4^-$ ), outros trabalhos demonstraram correlação positiva entre a CTC e o boro (ELRASHIDI & O'CONNOR, 1982);

5) correlação positiva entre areia grossa, conteúdo de matéria orgânica e concentração de boro total, diferente do esperado, já que os minerais gibbsita e caullinita, bem como a matéria orgânica, encontram-se normalmente na fração argilosa. No entanto, a matéria orgânica pode estar cobrindo os grãos de quartzo, assim como a gibbsita (SIMS & BINGHAM, 1967 e MARZADOORI *et al.*, 1991).

6) ausência de correlação entre o pH do solo/sedimento e as concentrações de boro, provavelmente devido ao reduzido intervalo de pH encontrado, assim como encontrado em ELRASHIDI & O'CONNOR (1982);

7) ausência de correlação entre a fração argila + silte com a CTC e íons trocáveis, diferente do esperado, já que esta é a principal fração onde ocorre a adsorção e troca iônica;

Pelas observações realizadas até então, o boro encontra-se fortemente adsorvido no sedimento do lago e em menor proporção no solo do aquífero, nos dois minerais que possibilitam a adsorção do boro no solo (GOLDBERG *et al.*, 1993) detectados pela difração de raio X (caulinita e gibbsita), podendo ambos ser a superfície de adsorção (S) visualizada na equação 4.

Em um estudo futuro, extrações sequenciais são interessantes para melhor caracterizar os materiais onde o boro encontra-se mais adsorvido, bem como uma caracterização química e

mineralógica da fração fina e pesada deve ser feita, visando um melhor entendimento do comportamento do boro adsorvido no sedimento de fundo, considerado como fonte secundária de boro.

Tabela 6.11 – Matriz de correlação entre os parâmetros químicos analisados no solo e sedimento de fundo, com a granulometria.

	B	B removível	pH CaCl <sub>2</sub>	M.O.	CTC	K	Ca	Mg	Al	H	Arg.+Sil.	Areia Mfi + fina	Areia Média	Areia Grossa + Grân.
B	1	<b>0.59</b>	-0.38	0.20	<b>0.66</b>	0.15	0.46	0.52	0.41	0.36	-0.34	-0.22	<b>-0.75</b>	<b>0.60</b>
B removível		1	-0.08	-0.12	<b>0.85</b>	0.20	<b>0.78</b>	<b>0.74</b>	-0.04	0.17	-0.08	0.08	-0.38	0.11
pH CaCl <sub>2</sub>			1	-0.26	-0.28	0.27	0.21	0.04	<b>-0.56</b>	<b>-0.90</b>	-0.20	0.52	<b>0.62</b>	-0.35
M.O.				1	0.05	0.14	-0.20	0.09	<b>0.60</b>	0.34	-0.28	<b>-0.66</b>	-0.48	<b>0.76</b>
CTC					1	0.33	<b>0.86</b>	<b>0.83</b>	0.17	0.29	-0.19	-0.11	-0.47	0.34
K						1	0.49	0.49	-0.19	-0.40	-0.07	0.11	-0.12	0.01
Ca							1	<b>0.86</b>	-0.18	-0.23	-0.24	0.24	-0.12	0.06
Mg								1	0.09	-0.12	-0.52	0.21	-0.17	0.30
Al									1	<b>0.54</b>	-0.42	<b>-0.55</b>	-0.48	<b>0.80</b>
H										1	0.22	<b>-0.63</b>	<b>-0.64</b>	0.41
Arg.+Sil.											1	-0.23	-0.14	<b>-0.58</b>
Areia Mfi + fina												1	<b>0.62</b>	<b>-0.64</b>
Areia Média													1	<b>-0.56</b>
Areia Grossa + Grân.														1

B – boro total; B removível – porcentagem do boro adsorvido lixiviável; M.O. – matéria orgânica; CTC – capacidade de troca catiônica; K, Ca, Mg, Al e H – cátions trocáveis; Arg. + Sil. – fração argila + silte; Mfi – areia muito fina; Grân. – grânulos. Os números em azul referem-se a correlações positivas e os números em vermelho à correlações negativas.

## 6.4. HIDROGEOQUÍMICA

### 6.4.1. Controle de Qualidade

Dentre os diversos procedimentos de controle de qualidade existentes para verificar a acuracidade dos padrões analíticos, o laboratório Bioagri Ambiental, responsável pelas análises de boro e ferro II utiliza o denominado LCS ou “amostra de controle de laboratório”, cuja concentração é conhecida (*spike*). Tal procedimento consiste na preparação de soluções padrões de concentrações conhecidas para os parâmetros a serem analisados. Esta amostra é então analisada junto com as demais amostras enviadas em cada campanha, ou seja, utilizando-se a mesma preparação, reagentes e métodos analíticos empregados para as amostras convencionais. Os resultados deste procedimento de controle de qualidade são expressos em termos de porcentagem de recuperação para cada parâmetro analisado.

Normalmente, nas análises químicas de compostos inorgânicos em amostras de água, esta porcentagem está inserida dentro do intervalo aceitável entre  $70\% < x < 130\%$ . Segundo HOUSNLOW (1994), a porcentagem de recuperação aceitável é maior que 70%. Nas campanhas de amostragem que tiveram controle de qualidade do laboratório, tais valores variaram entre 80 a 107%.

O Laboratório de Hidroquímica do CEPAS/USP, responsável pelas análises de ânions, verifica a exatidão dos seus resultados por meio da análise periódica das soluções padrão, porém não há procedimento de registro desses testes. O Laboratório de Química ICP-OES, responsável pelas análises de cátions efetua um controle de qualidade analítica através da utilização de brancos, duplicatas de análises e materiais internos ao laboratório “in house” para elaboração de curvas de calibração e controle de drift. Com o objetivo de analisar a confiabilidade dos resultados das análises químicas totais realizadas em laboratório, calculou-se a porcentagem do erro analítico a partir das concentrações obtidas em miliequivalentes dos ânions e cátions através do **balanço iônico**.

Os resultados do balanço iônico das amostras de água subterrânea para as duas campanhas estão apresentados no Anexo IX, e indicam que os resultados da campanha de março de 2005 são mais confiáveis, com porcentagem de erro abaixo de  $\pm 10\%$  em 77% das amostras, do que a campanha de outubro de 2005, quando somente 44% das amostras apresentaram erros abaixo de  $\pm 10\%$  (Figura 6.15), provavelmente devido à falta de precisão dos resultados de alcalinidade obtidos devido à titulação ter sido realizada logo após a amostragem, mas já em laboratório. Os resultados químicos das amostras de água estão apresentados no Anexo X.

A Figura 6.15 demonstra que na campanha de março de 2005 ocorreram erros entre 0 e 5% em 59% das amostras, enquanto na campanha de outubro de 2005, 44% das amostras

apresentaram erros entre 10 e 15%. Por outro lado, a campanha de março de 2005 apresentou erros acima de 45% em 18% das amostras, enquanto a campanha de outubro de 2005 não apresentou erros dessa magnitude. Os elevados erros observados nas amostras PM-08, PM-15, PM-18 e PM-19 na campanha de março de 2005 estão relacionados à determinação do sódio nas amostras PM-08 e PM-18, sódio + alcalinidade na amostra PM-15 e alcalinidade na amostra PM-19. Além desses fatores, os resultados analíticos de cátions das amostras PM-08 e PM-15 apresentaram concentrações abaixo do limite de detecção do laboratório para Fe, Mg e K e concentrações próximas ao limite de detecção para o Ca. Tais amostras foram desconsideradas no tratamento hidrogeoquímico, mas os demais parâmetros dessas amostras, tais como o boro e o cloreto foram considerados nos tratamentos estatísticos e de distribuição espacial com ressalvas. A amostra PM-01, apesar do erro igual a 11,7% foi considerada com reserva nos tratamentos utilizados, devido à inexistência de resultados dessa amostra na campanha de outubro de 2005, consequência de poço quase seco e muito sujo, cuja água não poderia ser filtrada em filtro de 0,45 $\mu$ m.

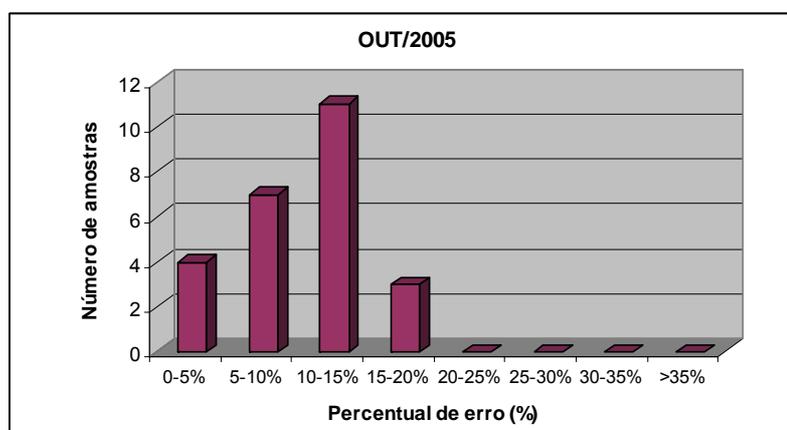
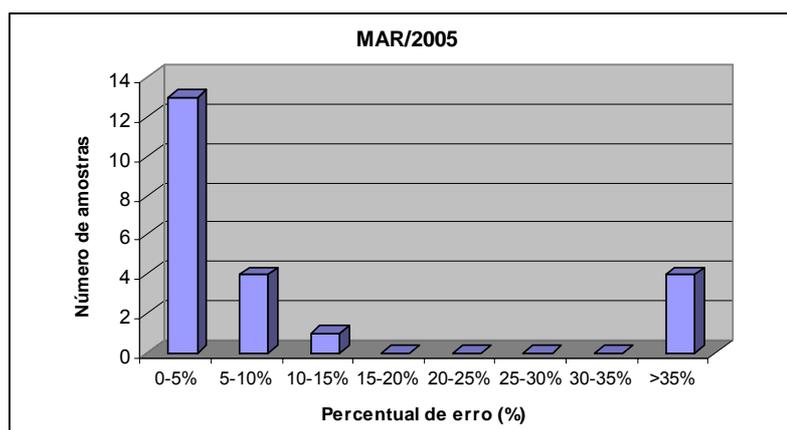


Figura 6.15: Percentuais de erros obtidos versus número de amostras analisadas.

As amostras da campanha de outubro de 2005 com erros percentuais muito acima de 10% foram descartadas dos tratamentos utilizados (PM-06, PM-10P, PM-58, PM-20 e S-48), porém houve uma maior tolerância com as amostras que apresentaram desvios ligeiramente superiores que 10% (PM-05, PM-08, PM-13, PM-19 e PP-03). Uma tolerância ainda maior foi dada às amostras Lago N, PZ-02 e PZ-03 cujos erros são respectivamente (-14,95%), (13,54%) e (-14,70%). Tais amostras serão interpretadas com ressalvas, mas fazem-se necessárias, já que o lago é uma das principais fontes de contaminação da água subterrânea, enquanto os PZs não foram amostrados na campanha de março de 2005.

#### **6.4.2. Classificação das Águas Subterrâneas**

Considerando as premissas estabelecidas no item 6.4.1, as amostras consideradas foram plotadas no diagrama de Piper divididas por campanha, permitindo distinguir os tipos hidroquímicos predominantes.

Os diagramas de Piper para as campanhas de março e outubro de 2005 estão demonstrados na Figura 6.16 e pode-se visualizar que a maior parte das amostras são bicarbonatadas sódicas, com concentrações variáveis de sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) e secundariamente as amostras são classificadas entre mistas e cloretadas sódicas, também com concentrações variadas de sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ).

De acordo com Parisot *et al.* (1985), que estudaram a geoquímica das águas do aquífero livre no entorno de um aterro sanitário de Taubaté, classificaram as águas sob a influência do aterro como cloretadas sódicas e fora da interferência do aterro à jusante, como bicarbonatadas cálcicas, composição natural das águas subterrâneas rasas na região, ambas com baixa concentração de sulfatos. Conclui-se portanto, que a composição da água subterrânea no entorno do lago enriquecida em sódio ( $\text{Na}^+$ ), cloreto ( $\text{Cl}^-$ ) e sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) é resultante dos lançamentos de efluente no lago, já que o ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ), hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ) e sulfato de alumínio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) são constituintes do tratamento.

Março / 2005

Outubro / 2005

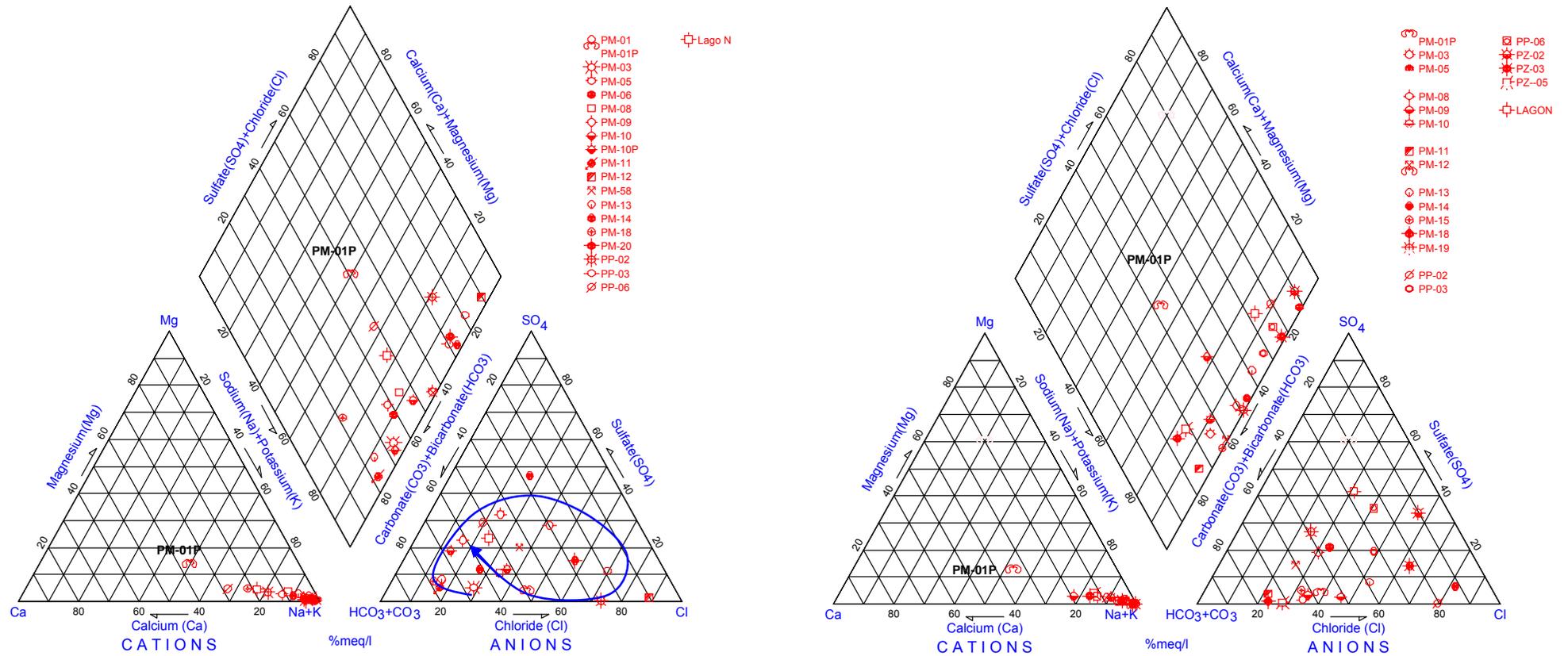


Figura 6.16: Diagramas de Piper (março e outubro de 2005).

Uma caracterização espacial das composições é dificultada devido aos pulsos de lançamento de efluente tratado que ainda existem no lago e às interferências de outras fontes de contaminação do subsolo. À despeito disso, algumas observações podem ser feitas com relação aos resultados hidroquímicos:

- quanto aos cátions, as amostras em sua totalidade encontram-se no vértice do Na + K, sendo o sódio (Na) correlacionado à presença de efluente no lago. Observa-se que a amostra PM-01P (Figura 6.16), cujo poço tem cota da seção filtrante mais profunda (555m), apresenta maior razão entre o cálcio e o sódio, o que pode representar a composição da água subterrânea com menor influência da água do lago. Além do PM-01P; os poços PM-09 (poço mais à jusante rumo NW), PM-18 (poço mais à jusante rumo N), PP-02, PP-06, PZ-05 e Lago N, apresentam altas razões entre esses íons relativamente aos outros poços, como mostra a Figura 6.17. A presença de altas concentrações de Na e baixas concentrações de Ca na água, pode também ser resultado do mecanismo de troca catiônica, onde o cálcio é adsorvido nas argilas e o sódio é liberado para a água subterrânea. Tal fato é afirmado pelas maiores concentrações de Ca entre os íons trocáveis (item 6.3.3.3).

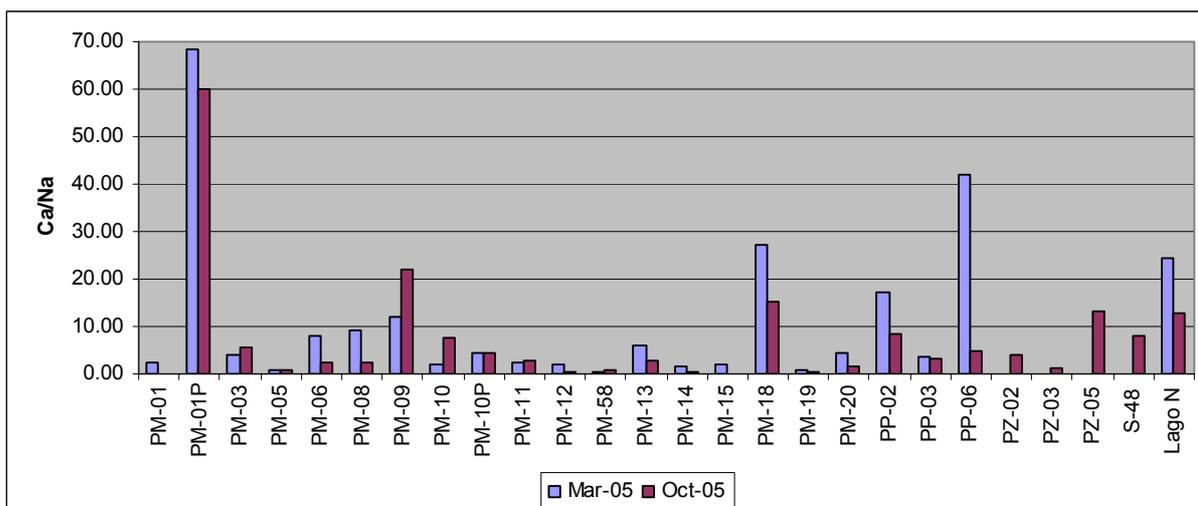


Figura 6.17: Razão entre os cátions Na e Ca nas amostras analisadas.

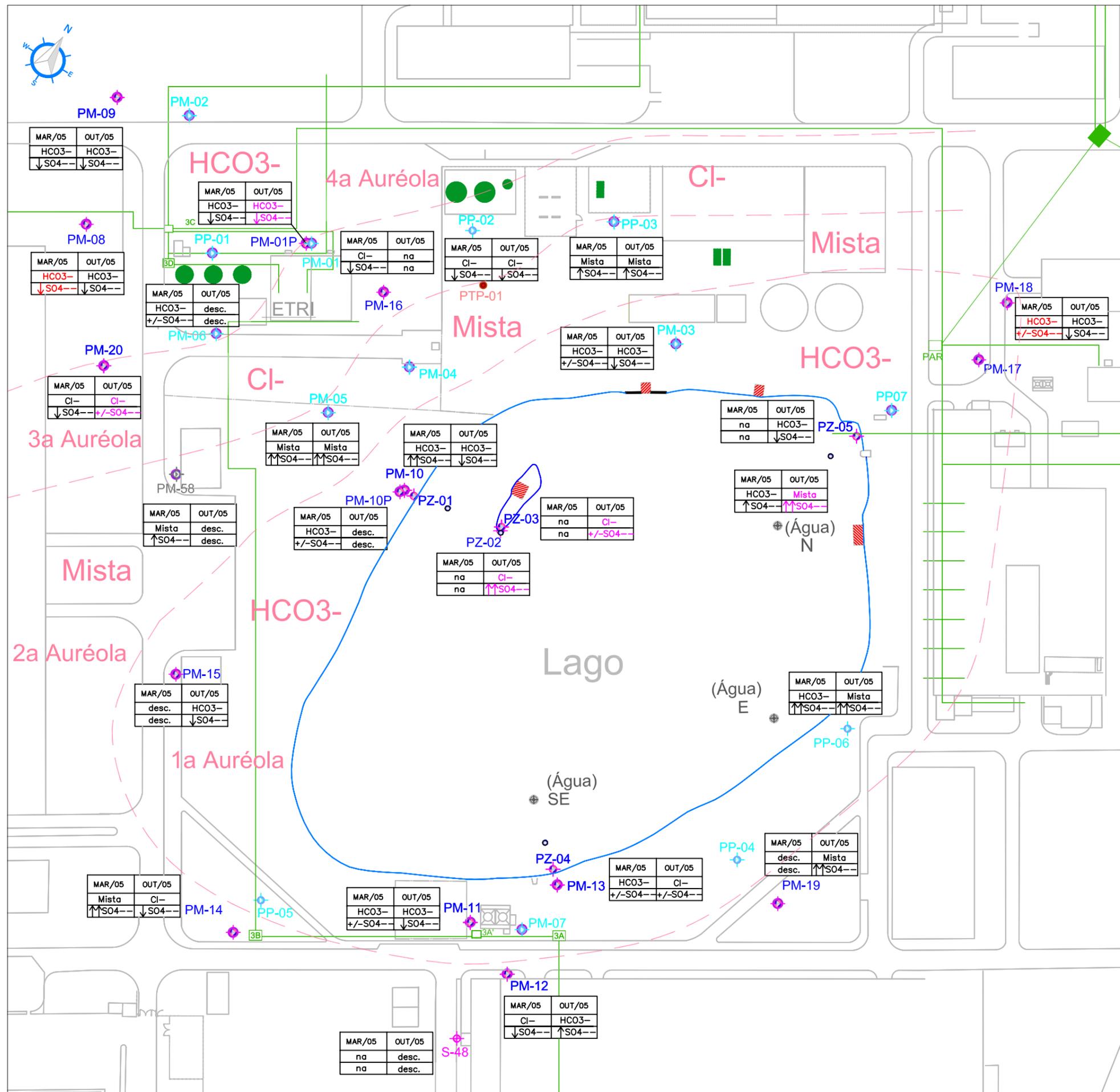
- quanto aos ânions, as amostras são em sua maioria bicarbonatadas, no entanto, os pulsos de efluente no lago causam um enriquecimento de cloreto na água subterrânea, alterando sua composição para cloretada sódica e para composição mista, resultante da mistura entre as duas. As máximas concentrações de sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) variam entre 62,3mg/L no PM-14 de composição mista em março de 2005 e 153,9mg/L no lago de composição mista em outubro de 2005, enquanto as mínimas variam entre 0,16mg/L no PP-02 de composição cloretada em março de 2005 e 0,24mg/L no mesmo poço, com mesma composição em outubro de 2005;

- quanto à variação espacial, a Figura 6.18 mostra uma aproximação das variações composicionais da água em área para a campanha de março de 2005. Nota-se que devido à maior influência do lago em seu entorno próximo, ou seja, maiores gradientes e velocidades de fluxo, a composição bicarbonatada sódica observada na primeira auréola é igual à do lago.

A segunda auréola de composição mista resulta da mistura entre a bicarbonatada sódica advinda do lago com a cloretada sódica observada na terceira auréola, advinda provavelmente de um pulso antigo de lançamento de efluentes no lago, que ainda não alcançou a quarta auréola novamente de composição bicarbonatada sódica, devido à diminuição da velocidade do fluxo nas porções mais distantes rumo NW do lago, associada à dispersão mecânica do cloreto ao longo do fluxo. Uma exceção na porção sudeste (SE) do lago é o PM-12 que tem composição cloretada sódica, devido provavelmente à influência do PAR (3A) localizado à montante.

Para a campanha de outubro de 2005, uma caracterização espacial das composições geoquímicas da água é dificultada devido devido à menor qualidade dos dados químicos, mas nota-se que para a porção oeste, a delimitação realizada na campanha de março de 2005 permanece, indicando pulso de lançamento recente que provavelmente ainda não alcançou essa porção. Algumas variações são observadas na porção leste do lago, tais como composição cloretada nas amostras PM-13 e PM-14, e composição mista das amostras PP-06 e PM-19, as únicas que apresentaram composição semelhante à do lago na primeira auréola delimitada.

- quanto à variação temporal, observa-se um aumento nas concentrações de sódio, cloreto e sulfato no lago na campanha de outubro de 2005, relacionado a um pulso recente de efluente e à maior velocidade de fluxo observada em época de estiagem, tornando a composição da água do lago mista e com altas concentrações de sódio e sulfato. Considerando esta variação, pode-se concluir que a campanha de março de 2005, foi realizada após um período do pulso de efluente no lago, o que explica a faixa de cloreto distante a aproximadamente 90m do lago.



LEGENDA:

- 3A REDE SUBTERRÂNEA DE EFLUENTE INDUSTRIAL E POÇOS DE ÁGUA RESIDUÁRIA (PAR)
  - TANQUES AÉREOS DE COMBUSTÍVEL E/OU ÓLEO
  - TANQUES DE COMBUSTÍVEL E/OU ÓLEO
  - PTP-01 POÇO TUBULAR PROFUNDO
  - PM-01 POÇO DE MONITORAMENTO (Outros, 2003)
  - PM-05 SONDAGEM E POÇO DE MONITORAMENTO (Outros, 2003)
  - PM-01 POÇO DE MONITORAMENTO (2004)
  - PM-10 SONDAGEM COM AMOSTRAGEM DE SOLO E ÁGUA SUBTERRÂNEA (2004)
  - PZ-01 PIEZÔMETROS (2004)
  - (Água) E ⊕ PONTOS DE AMOSTRAGEM DE ÁGUA, SOLO E SEDIMENTOS DO LAGO (2004 / 2005)
  - MARCOS TOPOGRÁFICOS - NÍVEL DO LAGO
  - AMOSTRAGEM DE ÁGUA SUBTERRÂNEA
- CLASSIFICAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA:
- | MAR/05   | OUT/05 |
|----------|--------|
| HCO3--   | HCO3-- |
| +/-SO4-- | ↓SO4-- |
- HCO3--: BICARBONATADA  
 CL--: CLORETADA  
 SO4--: CONCENTRAÇÕES DE SULFATO:  
 0 < [SO4--] < 10mg/L: ↓  
 10 < [SO4--] < 30mg/L: +/-  
 30 < [SO4--] < 40mg/L: ↑  
 [SO4--] > 40mg/L: ↑↑
- HCO3--: erro BI > 30%  
 HCO3--: 10 < erro BI < 15%  
 na: não amostrado  
 desc.: análises desconsideradas (erro BI>15%)
- DELIMITAÇÃO INFERIDA DA CLASSIFICAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA (MAR/2005)  
 HCO3--: BICARBONATADA SÓDICA  
 CL--: CLORETADA SÓDICA  
 MISTA: MISTA SÓDICA

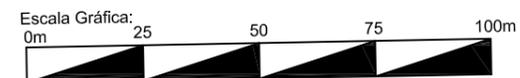


FIGURA 6.18 Mapa de Classificação Hidroquímica

Local Parque das Indústrias Taubaté , Brasil

Projeto : Tese de Mestrado

As Tabelas 6.12 e 6.13 demonstram matrizes de correlação entre os parâmetros químicos e físico-químicos analisados na água subterrânea e superficial, respectivamente nas campanhas de março e outubro de 2005, de onde pode-se tecer as seguintes observações:

- o pH apresenta correlação positiva com a condutividade elétrica (CE), fato explicado pelo consumo do íon hidrogênio em reações que disponibilizam outros íons, tais como dissolução de minerais carbonáticos e alteração de minerais silicáticos, como por exemplo a albita em caulinita. As correlações positivas entre a CE e os íons analisados (Tabelas 6.12, 6.13 e 6.14) corroboram esta hipótese, não excluindo a relação entre os íons presentes na água subterrânea e os pulsos de efluente no lago.

- correlação positiva entre a condutividade elétrica (CE) e os parâmetros boro (B), sódio ( $\text{Na}^+$ ) e bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) na campanha de março de 2005, indicando que estes parâmetros aumentam a mineralização da água nesta campanha, enquanto na campanha de outubro de 2005, a CE se correlaciona positivamente com a maioria dos íons ( $\text{B}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$  e  $\text{HCO}_3^-$ ). Tal fato pode ser relacionado ao evento de lançamento do efluente próxima à data de coleta da campanha de outubro de 2005;

- correlação negativa entre o Eh e os parâmetros  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$  e B. Tal correlação é esperada para o  $\text{Fe}^{2+}$ , já que é a forma reduzida do ferro, assim como para o  $\text{HCO}_3^-$ , que em meio oxidante é consumido. Não há uma explicação nítida para a correlação negativa entre o Eh e o  $\text{Na}^+$ ; nem para o boro na forma de ácido bórico, que ocorre em um amplo intervalo de Eh.

- quanto ao sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), observa-se correlação, apesar de não muito boa, com o  $\text{Na}^+$  na campanha de março de 2005 e com o  $\text{Cl}^-$  na campanha de outubro de 2005, indicando também fonte antrópica para este ânion. Observa-se que não há correlação do sulfato com o Eh, fato que era esperado devido à ocorrência de redução para sulfetos em ambientes redutores.

- correlações positivas entre os cátions  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , que apresentam baixas concentrações na água.

Tabela 6.12 – Matriz de correlação entre os parâmetros químicos e físico-químicos na água (março/2005).

	pH	C.E.	Eh	B	Fe <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
pH	1	0,26	-0,33	0,22	0,15	0,23	<b>0,76</b>	0,45	<b>0,53</b>	-0,08	0,43	0,30
C.E.		1	-0,47	<b>0,61</b>	0,29	<b>0,59</b>	0,37	0,10	0,08	-0,04	<b>0,65</b>	0,34
Eh			1	<b>-0,73</b>	<b>-0,57</b>	<b>-0,72</b>	-0,40	-0,33	-0,42	-0,21	<b>-0,81</b>	-0,38
B				1	<b>0,51</b>	<b>0,82</b>	0,46	0,06	0,13	0,03	<b>0,86</b>	0,47
Fe <sup>2+</sup>					1	0,21	<b>0,63</b>	<b>0,70</b>	<b>0,58</b>	-0,12	0,43	0,47
Na <sup>+</sup>						1	0,28	-0,10	-0,07	0,43	<b>0,79</b>	<b>0,49</b>
K <sup>+</sup>							1	<b>0,68</b>	<b>0,70</b>	-0,10	<b>0,56</b>	0,43
Ca <sup>2+</sup>								1	<b>0,92</b>	-0,03	0,20	0,27
Mg <sup>2+</sup>									1	-0,05	0,29	0,12
Cl <sup>-</sup>										1	0,12	-0,05
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>											1	0,25
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>												1

Tabela 6.13 – Matriz de correlação entre os parâmetros químicos e físico-químicos na água (outubro/2005).

	pH	C.E.	B	Fe <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
pH	1	<b>0,70</b>	0,21	0,02	<b>0,61</b>	<b>0,81</b>	<b>0,63</b>	<b>0,62</b>	0,45	0,43	<b>0,67</b>
C.E.		1	<b>0,69</b>	-0,02	<b>0,96</b>	<b>0,75</b>	<b>0,64</b>	<b>0,68</b>	<b>0,65</b>	<b>0,76</b>	0,44
B			1	0,02	<b>0,78</b>	0,28	0,15	0,20	0,31	<b>0,59</b>	0,11
Fe <sup>2+</sup>				1	-0,02	-0,08	0,01	-0,09	0,10	0,13	-0,03
Na <sup>+</sup>					1	<b>0,61</b>	0,43	<b>0,48</b>	<b>0,63</b>	<b>0,72</b>	0,44
K <sup>+</sup>						1	<b>0,77</b>	<b>0,86</b>	<b>0,55</b>	<b>0,49</b>	0,41
Ca <sup>2+</sup>							1	<b>0,95</b>	0,38	<b>0,65</b>	0,13
Mg <sup>2+</sup>								1	0,42	<b>0,65</b>	0,10
Cl <sup>-</sup>									1	0,25	<b>0,55</b>
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>										1	-0,05
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>											1

Tabela 6.14 – Matriz de correlação entre os parâmetros químicos e físico-químicos na água entre as diversas campanhas (JUL/04, MAR/05 e OUT/05).

	Jul/2004			Mar/2005							Out/2005							
	B	pH	CE	pH	CE	Eh	B	Na <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	pH	CE	Eh	B	Na <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	
Jul/04	B	1	0,44	0,17	0,27	0,24	-0,39	<b>0,78</b>	<b>0,69</b>	0,07	<b>0,57</b>	0,40	<b>0,77</b>	<b>-0,62</b>	<b>0,93</b>	0,17	<b>0,82</b>	0,48
	pH		1	<b>0,74</b>	<b>0,93</b>	0,20	-0,05	0,09	0,13	-0,09	0,26	<b>0,96</b>	<b>0,66</b>	-0,23	0,17	-0,07	0,49	0,33
	CE			1	<b>0,78</b>	-0,12	-0,11	-0,10	-0,11	-0,04	0,12	<b>0,75</b>	0,37	-0,09	-0,04	-0,08	0,18	-0,04
Mar/2005	pH			1	0,19	-0,22	0,07	0,16	0,13	0,36	<b>0,92</b>	<b>0,58</b>	-0,12	0,00	-0,22	0,37	0,41	
	CE				1	-0,41	0,50	0,55	0,31	<b>0,62</b>	0,16	0,24	-0,51	0,24	0,51	0,15	0,36	
	Eh					1	<b>-0,70</b>	<b>-0,74</b>	<b>-0,72</b>	<b>-0,82</b>	-0,03	-0,33	0,46	-0,39	-0,09	-0,27	-0,50	
	B						1	<b>0,87</b>	0,37	<b>0,79</b>	0,04	0,47	<b>-0,57</b>	<b>0,79</b>	0,17	0,53	0,53	
	Na <sup>+</sup>							1	<b>0,70</b>	<b>0,87</b>	0,15	<b>0,66</b>	-0,55	<b>0,76</b>	0,05	<b>0,71</b>	<b>0,70</b>	
	Cl <sup>-</sup>								1	<b>0,65</b>	0,01	0,35	-0,20	0,21	-0,20	0,34	0,50	
Out/2005	HCO <sub>3</sub>									1	0,26	0,54	-0,54	0,55	0,18	0,48	0,54	
	pH										1	<b>0,74</b>	-0,30	0,18	-0,07	<b>0,56</b>	0,36	
	CE											1	<b>-0,61</b>	<b>0,70</b>	0,02	<b>0,95</b>	<b>0,69</b>	
	Eh												1	<b>-0,64</b>	<b>-0,71</b>	-0,52	-0,39	
	B													1	0,21	<b>0,82</b>	0,40	
	Na <sup>+</sup>														1	-0,07	-0,15	
Cl <sup>-</sup>															1	<b>0,65</b>		
HCO <sub>3</sub>																	1	

### **6.4.3. Contaminação das Águas Subterrâneas por Boro**

Os resultados de boro na água subterrânea e sua distribuição espacial e temporal serão apresentados neste capítulo, bem como a comparação entre os íons cloreto e sódio, devido às altas concentrações presentes nas águas. Os resultados para pH, Eh, alcalinidade e condutividade elétrica também serão discutidos. Os resultados das medições *in situ* e das concentrações dos parâmetros analisados encontram-se no Anexo X.

Dentre os compostos presentes na água subterrânea, encontram-se em altas concentrações o sódio, o cloreto e o boro, porém, apenas o boro foi detectado em concentrações acima do valor de intervenção para água subterrânea (0,5mg/L), segundo a lista de valores orientadores da CETESB (2005). O valor de intervenção representa a máxima concentração de uma substância que não causa riscos potenciais, diretos ou indiretos, à saúde humana, considerando-se um cenário de exposição genérico. Concentrações acima desse valor, demandam ações para resguardar os receptores de risco (CETESB, 2005). No entanto, para a água subterrânea, tais valores são baseados nas concentrações das substâncias que causam risco à saúde humana listados na Portaria 518 do MS (2004), complementados pelos padrões de potabilidade do Guia da Organização Mundial da Saúde (2004), utilizado neste caso para o boro.

Na área em estudo, concentrações acima do valor de intervenção CETESB de boro (0,5mg/L) são observadas (1,30mg/L a 1,66mg/L), bem como inferiores ao limite de detecção do laboratório, que variou entre 0,05 e 0,01mg/L, podendo ser consideradas como *background* de boro na área. Os poços que apresentaram concentrações *background* de boro desde a primeira campanha (julho de 2003) são aqueles localizados na porção NW do lago (PM-01, PM-01P, PM-02, PM-08, PM-09, PM-20, PP-01 e PP-02), setor onde o gradiente hidráulico e a velocidade de fluxo são menores. Dentre esses poços, o boro foi detectado abaixo do limite de detecção do laboratório apenas nos PM's 08, 09 e 20 na campanha mais atual (outubro de 2005), indicando que a pluma ainda está em movimento no sentido do fluxo.

As maiores concentrações de boro em julho de 2003, dois meses após o encerramento da fonte primária, foram observadas inicialmente na água do lago (3,4mg/L), e nos poços do entorno mais próximo do lago (PM-05 - 0,93mg/L; PP-06 - 1,18mg/L; PP-07 - 1,26mg/L). Em julho de 2004, um ano após o cessar da fonte primária, as concentrações de boro no lago caíram quase pela metade (0,58mg/L), enquanto as maiores concentrações no aquífero permaneceram com a mesma ordem de magnitude, sendo observadas novamente nos poços do entorno mais próximo do lago (porção SE: PM-13 - 1,49mg/L, PM-12 - 1,32mg/L, PM-11 - 1,30mg/L e porção W: PM-10 - 1,30mg/L e PM-05 - 0,97mg/L), onde os gradientes hidráulicos e as velocidades de fluxo são maiores. Em março de 2005, as concentrações no lago diminuíram

quase três vezes (0,17mg/L), enquanto no aquífero as maiores concentrações apresentaram ligeiro aumento, mantendo-se nos poços do entorno mais próximo do lago (PM-10 - 1,66mg/L e PM-05 - 0,96mg/L; PM-11 - 1,46mg/L e PM-13 - 1,44mg/L e PP-06 - 0,97mg/L). Em outubro de 2005, as concentrações no lago se mantiveram (0,19mg/L), as maiores concentrações no aquífero apresentaram relativa redução (PM-10 - 1,05mg/L e PM-05 - 0,99mg/L; PM-11 - 0,85mg/L, PM-12 - 1,10mg/L, PM-13 - 0,72mg/L), com exceção do PP-06 - 1,30mg/L; ao mesmo tempo, observou-se um avanço da pluma caracterizado pelo aumento das concentrações em poços mais externos ao lago (PM-18 - 1,00mg/L, PM-15 - 0,92mg/L, PM-01P - 0,06mg/L, PP-02 - 0,10mg/L e PP-03 - 0,09mg/L). As Figuras 6.19 e 6.22 mostram o comportamento do boro em relação ao tempo, a Figura 6.20 demonstra o comportamento do boro em relação à distância do lago e a Figura 6.21 demonstra o comportamento do boro em relação às profundidades dos poços.

Outras observações podem ser tecidas à respeito do comportamento do boro no aquífero raso:

- nota-se uma redução significativa nas concentrações de boro no PM-14 em OUT/2005, podendo estar relacionada ao material geológico mais permeável composto por lentes de areia média a grossa associado ao aumento da velocidade de fluxo nessa época;

- o poço PM-10P apresentou concentrações de boro 4 vezes maior na campanha de março de 2005 (0,89mg/L) em relação às campanhas de julho de 2004 e outubro de 2005 (0,21mg/L e 0,29mg/L), tal fato pode estar relacionado à diferenciação hidroquímica das águas do lago (fonte) ao longo do fluxo da água subterrânea;

- os poços PM-03, PM-05 e PM-58 demonstraram pequena variação nas concentrações de boro ao longo do tempo, provavelmente devido ao material geológico com composição mais argilosa e menor condutividade hidráulica;

- os poços PM-12 e PM-19 apresentaram redução de 10 e 4 vezes respectivamente, em suas concentrações de boro na campanha de março de 2005. A redução das concentrações em época de chuva é esperada devido à maior diluição, mas tal comportamento errático nas concentrações pode ser devido à erro analítico, infiltração superficial de água de chuva dentro dos poços e vazamento na linha de efluente (no caso do PM-12), já que as condutividades hidráulicas medidas nesses poços é da mesma ordem de grandeza que as medidas nos poços do entorno do lago.

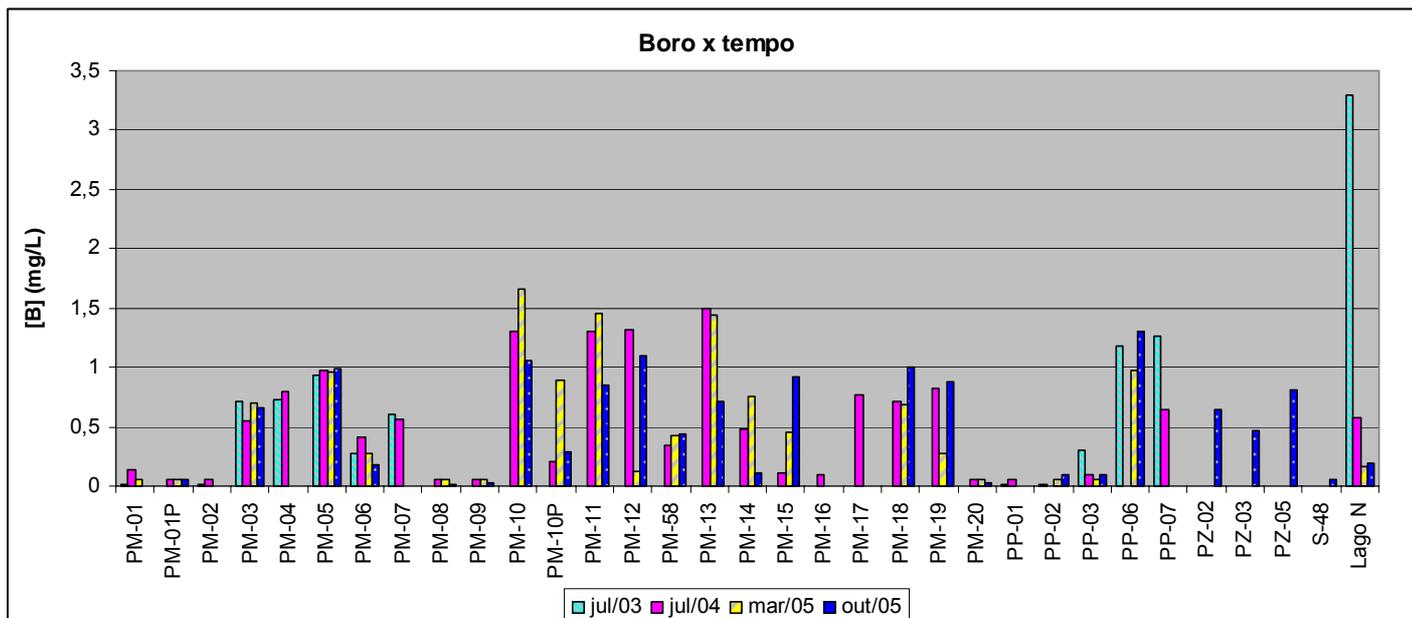


Figura 6.19: Comportamento do boro x tempo.

As concentrações de boro no aquífero (PMs) mantiveram-se no geral com a mesma magnitude ao longo do tempo, com as exceções já expostas anteriormente, enquanto as concentrações na água do lago apresentaram uma redução significativa de quase 20 vezes, após aproximadamente dois anos do cessar da fonte primária.

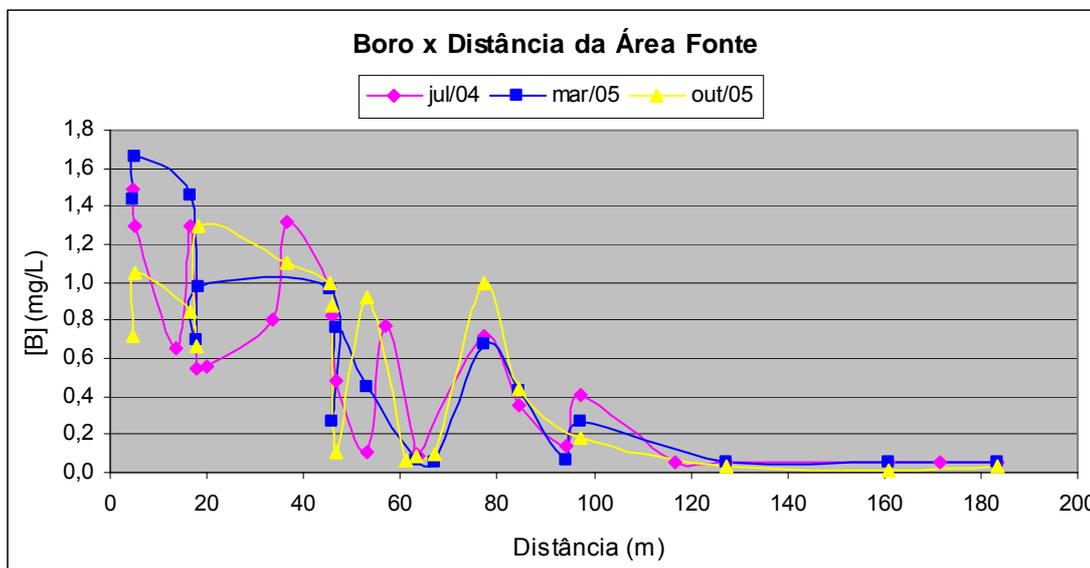


Figura 6.20: Comportamento do boro x distância da principal área fonte.

Apesar das interferências nas concentrações de boro presentes no aquífero já descritas anteriormente, tais como litotipos menos permeáveis, gradientes hidráulicos diferenciados e existência de fontes secundárias, observa-se que no geral, as concentrações de boro diminuem

com o aumento da distância do lago (principal área fonte), ou seja, no sentido do fluxo subterrâneo, devido à diminuição do gradiente hidráulico e da velocidade de fluxo.

A Figura 6.22 mostra a variação do comportamento do boro em área e ao longo do tempo e as áreas onde as concentrações de boro estão acima do valor de intervenção CETESB (2005) através das isolinhas vermelhas (0,5mg/L). As maiores concentrações de boro existentes no lago ocorreram em julho de 2003, impactando o aquífero no sentido do fluxo subterrâneo. Em julho de 2004 houve uma queda nas concentrações de boro no lago, enquanto no aquífero, as maiores concentrações ocorreram nos poços PM-10 (porção W), PM-11, PM-12 e PM-13 (porção SE). Em março de 2005, as concentrações do lago decresceram ainda mais, enquanto no aquífero, os poços PM-03, PM-05, PM-10, PM-11, PM-13 ainda apresentaram as maiores concentrações. O mapa da campanha de outubro de 2005 mostra uma configuração um pouco diferente, pois nota-se um incremento das concentrações no aquífero rumo norte, leste e oeste do lago, indicando que a pluma de boro ainda está em movimento no sentido do fluxo, enquanto as concentrações no lago permanecem constantes indicando um equilíbrio no sistema lago, após aproximadamente dois anos do cessar da fonte primária. A presença de altas concentrações de boro rumo SE do lago (PM-11 e PM-12) é notória nas três campanhas de monitoramento, apesar desses poços não estarem tão próximos do lago. Tal fato pode ser explicado pelos maiores gradientes e velocidades de fluxo nessa porção do lago, bem como a presença de fonte secundária constituída pela linha de efluente e PARs. Outra observação importante é que além de as concentrações diminuírem lateralmente, observa-se que há um decréscimo também em profundidade no sentido do fluxo subterrâneo (Figura 6.21).

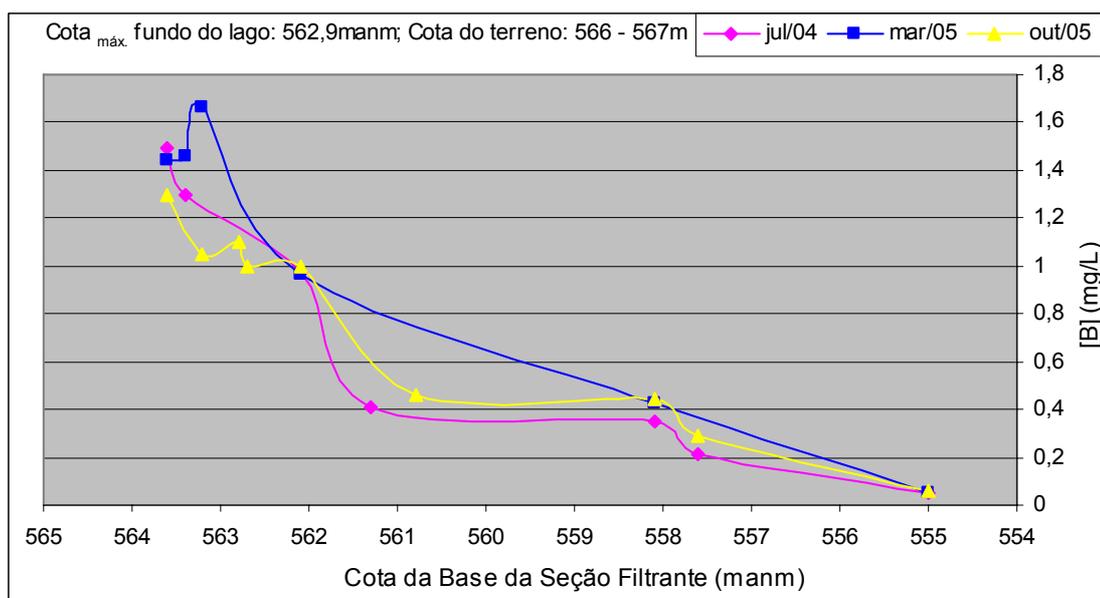


Figura 6.21: Comportamento do boro x profundidade dos poços.

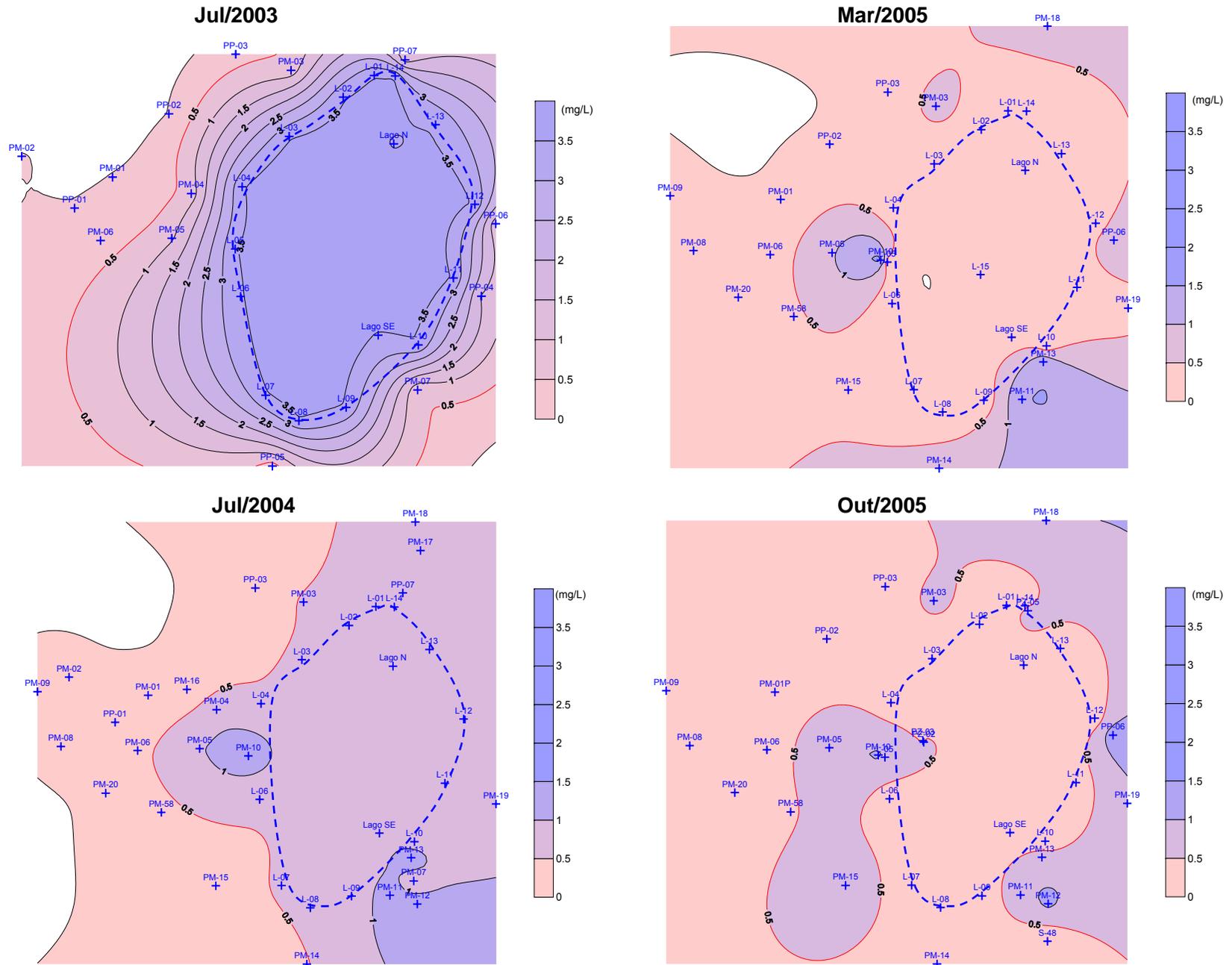


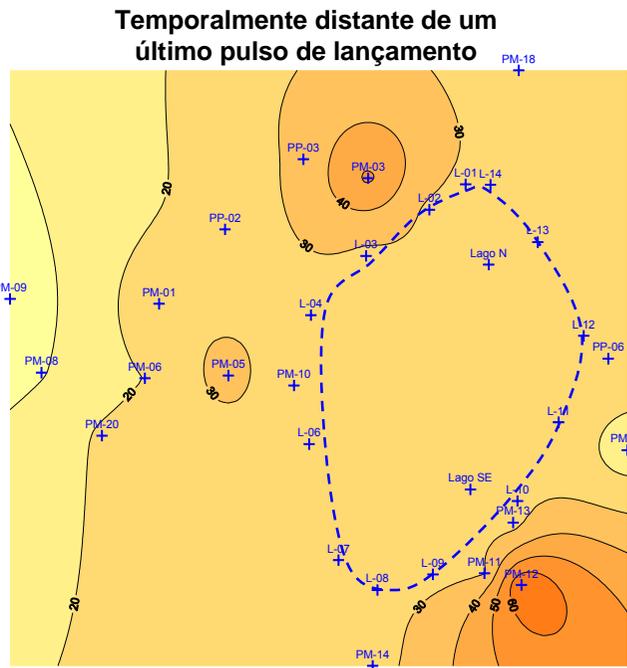
Figura 6.22: Variação do comportamento do boro em área ao longo do tempo.

A correlação positiva entre o B, Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> e HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, juntamente com a CE, indica que estes parâmetros são mineralizadores da água subterrânea e indicadores de contaminação antrópica, mesmo que uma parcela das concentrações de sódio e bicarbonato sejam também advindas da própria constituição geoquímica do aquífero.

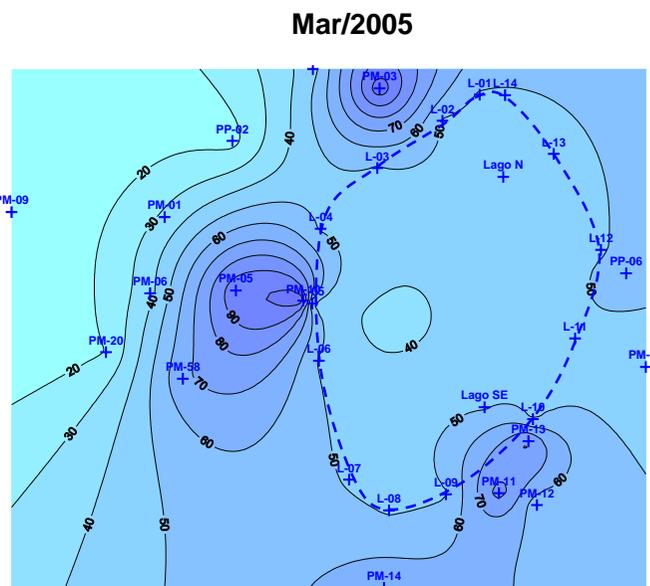
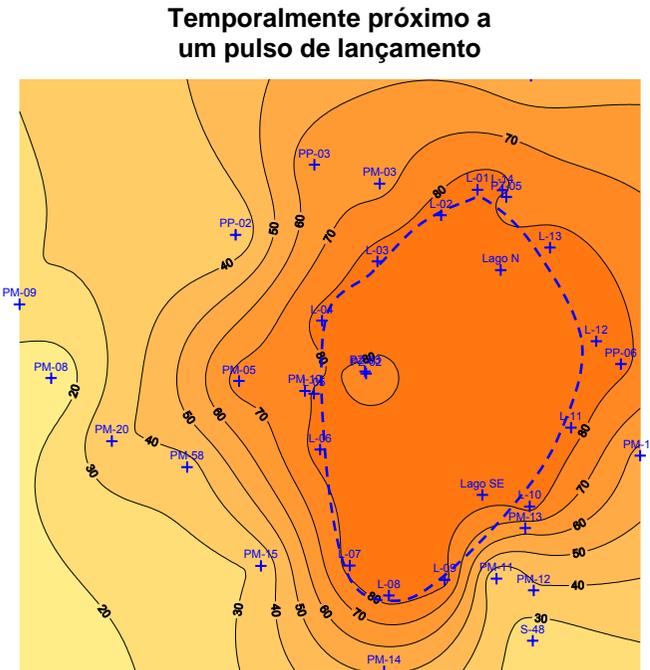
Como já citado anteriormente, a correlação negativa entre as concentrações de boro e o Eh não é esperada, já que a ocorrência das formas químicas do B é variável somente quanto ao pH, em um grande intervalo de Eh.

Comparando-se as concentrações de boro com os outros parâmetros químicos e físico-químicos de interesse ao longo das três campanhas (Tabela 6.14), observa-se a não correlação entre o pH da água e a concentração de boro, que esperava-se ser negativa, já que a faixa ótima de adsorção do boro no solo está entre pH 8 e 9.

Visando comparar o comportamento do boro com os íons cloreto e sódio, mapas de isoconcentração foram confeccionados para ambas as campanhas de março e outubro de 2005 (Figura 6.23). Pode-se observar que o comportamento do cloreto e do sódio são muito semelhantes em ambas as campanhas, porém bem diferenciados entre elas. Em março de 2005, nota-se ilhas de maiores concentrações no entorno dos poços PM-03, PM-05 e PM-12 para o cloreto e para o sódio, abrangendo uma maior área para o sódio, que envolve também o poço PM-10 localizado próximo ao PM-05 e os poços PM-11 e PM-13, próximos ao PM-12, devido às maiores concentrações e ao comportamento diferenciado deste íon, que pode apresentar adsorção e troca iônica, enquanto o cloreto caminha juntamente com a água subterrânea, sofrendo apenas dispersão. Faz-se notória a semelhança do comportamento do boro nesta campanha (Figura 6.22). Como citado anteriormente, tais ilhas estão relacionadas diretamente com o litotipo do aquífero nos poços PM-03 e PM-05, constituídos por argila siltosa e argila arenosa, com condutividades hidráulicas provavelmente menores. Sendo o lago a fonte de cloreto, as maiores concentrações deste íon observadas nos PMs 03 e 05 em relação às concentrações presentes no lago, podem também estar relacionadas à diferenciação de concentrações no lago, advindas do novo ponto de lançamento de efluente localizado na porção W do lago (Figura 5.1). No caso do PM-12, como também já citado, as maiores concentrações de cloreto observadas, afirmam a hipótese de contribuição de uma fonte secundária, no caso a linha de efluentes e os PARs presentes nesta porção do lago. Quanto à campanha de outubro de 2005, o comportamento de ambos os íons é novamente semelhante, ficando nítida a relação do lago como fonte principal desses íons e afirmando a hipótese anteriormente citada, desta campanha ter sido consecutiva a um pulso de lançamento de efluente no lago. Se comparada à configuração do boro para esta data, nota-se a grande diferença, pois o efluente não é mais rico em boro.



**Cl<sup>-</sup>**



**Na<sup>+</sup>**

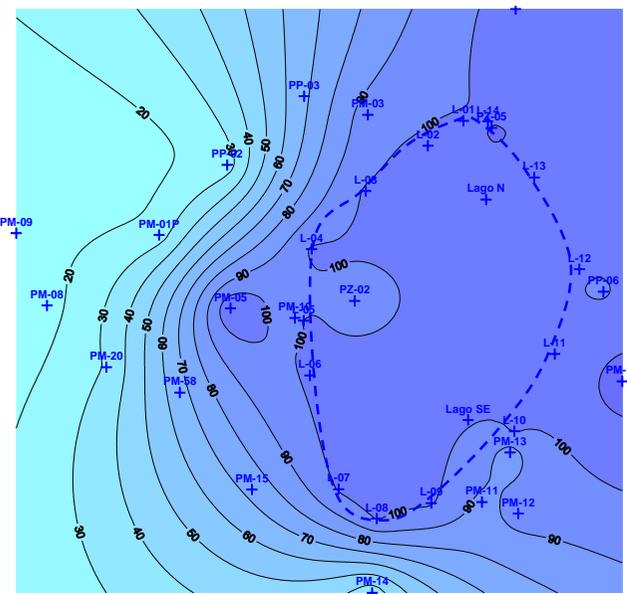


Figura 6.23: Variação do comportamento do Cl<sup>-</sup> e do Na<sup>+</sup> em área ao longo do tempo.

#### 6.4.4. Comportamento Geoquímico do Boro – Lago x Aquífero

Neste capítulo, as concentrações de boro ao longo do tempo nos diferentes meios em que ocorre são comparadas, correlacionando-as a todos os parâmetros químicos, físico-químicos, texturais e mineralógicos, visando a melhor compreensão do comportamento geoquímico do boro.

Os pontos de amostragem considerados para a confecção da Tabela 6.15 foram aqueles que apresentaram as maiores concentrações de boro. O ponto de amostragem de água superficial, sedimento de fundo e material do aquífero (Lago N) considerado para as campanhas de março e outubro de 2005, corresponde ao ponto de maior profundidade do lago, enquanto os poços considerados são aqueles mais próximos ao lago. Obtendo-se a concentração de boro no sedimento de fundo em volume, multiplicando-se as concentrações em massa pela densidade média dos sedimentos ( $2,3\text{g/cm}^3$ ), nota-se que as concentrações do boro em volume nos sedimentos do fundo do lago e do aquífero são muito superiores às aquelas observadas nas águas.

Tabela 6.15 – Comparação entre as concentrações de boro nos meios em estudo ao longo do tempo.

Meios	JUL/2003	JUL/2004	MAR/2005	OUT/2005
Água Superficial - Lago	3,56mg/L	0,58mg/L	0,16mg/L	0,19mg/L
Sedimento de fundo - Lago	320mg/kg	114mg/kg	112mg/kg	92mg/kg
	736mg/L	262,2mg/L	257,6 mg/L	211,6 mg/L
Solo subjacente ao sedimento - Aquífero	67mg/kg	10,9mg/kg	49,8mg/kg	14mg/kg
	154,1mg/L	25,07mg/L	114,54mg/L	32,2mg/L
Água Subterrânea (PP-06)	1,18mg/L	----x----	0,97mg/L	1,3mg/L
Água Subterrânea (PM-10)	----x----	1,3mg/L	1,66mg/L	1,05mg/L
Água Subterrânea (PM-13)	----x----	1,49mg/L	1,44mg/L	0,72mg/L

A Tabela 6.15 mostra que um equilíbrio entre os meios foi alcançado após aproximadamente dois anos do cessar da fonte primária de boro, consequência do próprio consumo da massa contaminante inicial através da adsorção no sedimento de fundo do lago e no solo ao longo do caminhar da pluma no aquífero. Os mecanismos químicos e físico-químicos que melhor explicam essas afirmativas estão explicitados na Tabela 6.16 e na Figura 6.24.

Observando a Tabela 6.16, é nítida a adsorção do boro no sedimento de fundo e em menor concentração no aquífero. O fato de o boro estar mais adsorvido no sedimento de fundo está de acordo com o mecanismo de adsorção do boro segundo bibliografia, que se dá em crescentes concentrações em soluções com pH entre 5,0 e 9,2, estando o patamar de máxima adsorção no intervalo de pH entre 8,0 e 9,0, portanto, o pH alcalino do lago está contribuindo para essa maior adsorção.

Comparando-se o pH da água do lago com os pHs encontrados no aquífero (Tabela 6.16), observa-se que há um aumento considerável nas concentrações do íon  $H^+$  entre o lago e o aquífero. Tal fato pode estar relacionado à alta atividade fotossintetizante de bactérias e algas (fitoplâncton) na água do lago, que consome os íons  $H^+$ , conferindo a característica de tamponamento do lago.

O pH obtido para os sedimentos do aquífero são próximos àqueles observados na água, no entanto, o pH do sedimento de fundo é muito ácido em relação ao pH da água do lago. A característica alcalina do lago pode estar relacionada à alta atividade fotossintetizante do fitoplâncton, enquanto que o pH ácido do sedimento de fundo pode ser resultante da ocorrência de maior degradação de matéria orgânica na interface do sedimento de fundo, fato que poderia ser comprovado através da medição de Eh/pH e OD no sedimento de fundo e na interface água do lago/sedimento *in situ*. PINHEIRO (2001) estudou sedimentos lacustres no Parque Ecológico do Tietê e observou características semelhantes de pH entre a água da interface (alcalino) e sedimento de fundo do lago (ácido), sugerindo ambas as hipóteses citadas acima.

A diminuição das concentrações de boro na água do lago e no sedimento de fundo ao longo do tempo está relacionada com o cessar da fonte primária e aos processos de adsorção. Paralelamente, as concentrações de boro no solo do aquífero e na água subterrânea permaneceram no geral homogêneas, apesar de um lento movimento da pluma rumo norte, leste e oeste ser observado na última campanha (outubro de 2005), o que poderia estar consumindo a massa contaminante de boro.

Sabe-se que o boro em suas formas mais comuns ( $H_3BO_3$  e  $B(OH)_4^-$ ) não sofre nenhum processo de biotransformação (WHO, 1998) e possui baixo potencial de bioacumulação (BARRES, 1967, apud WHO, 1998), no entanto, as bactérias são relativamente tolerantes em relação ao boro, sendo este um micronutriente essencial para as cianobactérias e diatomáceas (WHO, 1998). Muito provavelmente as cianobactérias e diatomáceas estão presentes no fitoplâncton da água do lago e podem estar consumindo parte de massa contaminante do boro, colaborando com sua redução. Tal fato, entretanto, poderia ser comprovado através de análises químicas quantitativas do material particulado em suspensão para o boro (ICP) e através de análises químicas qualitativas em microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Tabela 6.16 – Comparação entre parâmetros químicos e físico-químicos nos diferentes meios.

Meios	Concentração (MAR-OUT/05)	pH	Forma química do boro predominante	Observações	Material geológico /textura	Mineralogia	Principais reações químicas
Água Superficial - Lago	0,16 - 0,19mg/L	9,14- 9,76	$B(OH)_4^-$	Alta afinidade por argila	---x---	---x---	$H_3BO_3 + 2H_2O \leftrightarrow B(OH)_4^- + H_3O^+$ Eutrofização: consumo $H^+$ / fonte de $HCO_3^-$ Tamponamento do sistema
Sedimento de fundo - Lago	211,6 - 257,6mg/L	4,3- 5,3	$H_3BO_3 / B(OH)_3$	Baixa afinidade por argila	teor de arg (11,7%)	Qtz Kau e m (S) Gibb (S)	Degradação de M.O.: $\uparrow H^+$ $\uparrow SOH_{(s)} + H_3BO_3^0_{(aq)} = SH_2BO_3^0_{(s)} + H_2O_{(l)}$
Solo subjacente ao sedimento - Aquífero	32,2 - 114,5mg/L	5,0- 5,5	$H_3BO_3 / B(OH)_3$	Baixa afinidade por argila	Argila arenosa - teor de arg (47,7%)	Qtz Kau e m (S) Gibb (S)	$\downarrow SOH_{(s)} + H_3BO_3^0_{(aq)} = SH_2BO_3^0_{(s)} + H_2O_{(l)}$
Água Subterrânea (PM-10)	1,05 - 1,66mg/L	6,6- 6,8	$H_3BO_3 / B(OH)_3$	Baixa afinidade por argila	---x---	---x---	$H_3BO_3 + 2H_2O \leftrightarrow B(OH)_4^- + H_3O^+$

qtz - quartzo; kau - caolinita; gibb - gibbsita e m - mica, arg - argila

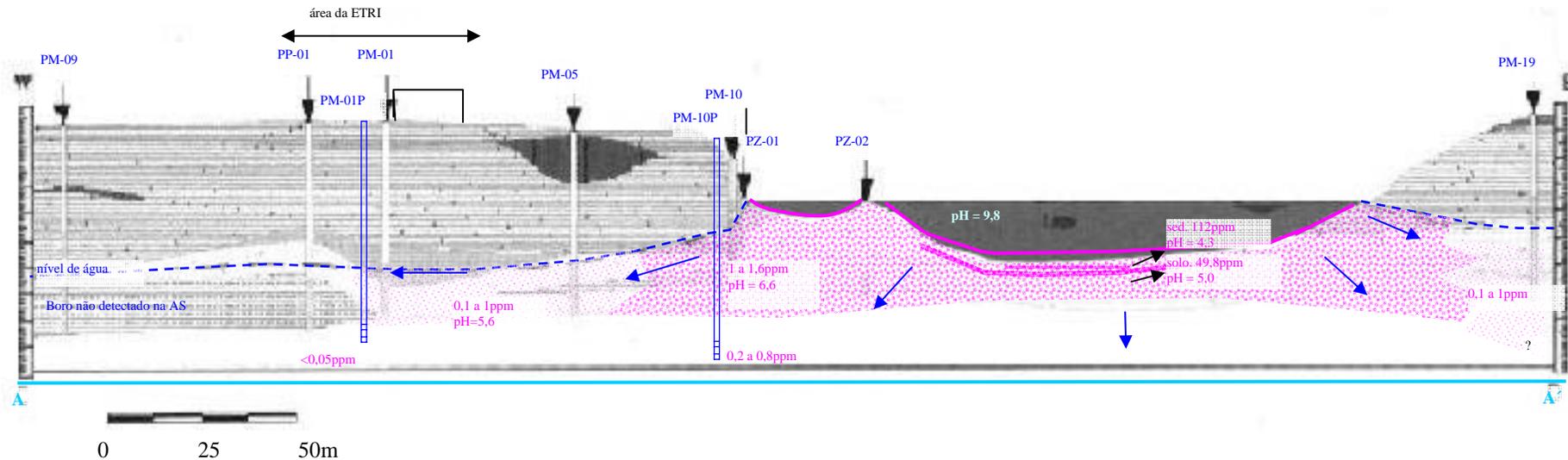


Figura 6.24: Seção geológica A-A' mostrando as variações químicas e físico-químicas nos meios em estudo.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O material geológico do aquífero é heterogêneo na área de estudo, não sendo possível uma delimitação de porções específicas de ocorrência para cada litotipo, no entanto, há uma predominância de argila arenosa com intercalações decimétricas de areia média a grossa. Em locais distribuídos na área predomina-se uma argila siltosa, observada também estratigraficamente sotoposta ao pacote de argila arenosa; e em algumas áreas ocorrem camadas de areia fina a média, também sotopostas ao pacote de argila arenosa.

As análises granulométricas realizadas no sedimento de fundo do lago e no solo do aquífero caracterizaram texturalmente os materiais como areno siltoso e argilo arenoso, respectivamente.

As condutividades hidráulicas medidas no entorno do lago variam entre  $8,12 \times 10^{-6} \text{m/s}$  a  $1,7 \times 10^{-7} \text{m/s}$ , enquanto que no restante da área fabril as condutividades hidráulicas medidas variam entre  $1,08 \times 10^{-5} \text{m/s}$  e  $5,20 \times 10^{-7} \text{m/s}$ , caracterizando sedimentos relativamente permeáveis.

O contexto hidrogeológico da área fabril é caracterizado pela influência do lago em relação ao aquífero, onde os gradientes verticais variam entre 11% na porção oeste a 37% na porção norte do lago em época de estiagem e entre 3% e 5% (porção oeste) em época de verão. Já os gradientes hidráulicos verticais entre os poços PM-10 e PM-10P localizados na margem oeste do lago são iguais a 22% e 9% para verão e inverno, concluindo-se que o lago influencia o aquífero verticalmente em maior proporção na época de inverno e que o maior gradiente vertical observado entre os PM-10 e PM-10P na margem oeste do lago é resultante da maior recarga nas áreas não impermeabilizadas em época de verão e à menor influência do lago na recarga do aquífero nessa época.

Lateralmente, os maiores gradientes hidráulicos, bem como as velocidades de fluxo são observados no entorno próximo do lago também em época de estiagem, quando o lago contribui mais com a recarga no aquífero. Os gradientes hidráulicos e as velocidades de fluxo diminuem com o distanciamento do lago até aumentarem novamente devido à influência das zonas de descarga locais constituídas pelos córregos localizados no rumo leste e oeste da área fabril, porém as maiores velocidades observadas em direção aos córregos, não são tão expressivas quanto às observadas no entorno próximo do lago:

- Em março de 2005, o maior gradiente hidráulico observado foi de 3% entre o lago e o PM-13 (porção SE) e o menor gradiente de <1% entre o lago e PM-57 (rumo S), com média de 1%. A maior velocidade observada foi de 121,0m/ano entre o lago e o PM-13 (porção SE), a menor velocidade foi de 0,2m/ano entre o PP-01 e o PM-09

(porção W), com média igual a 22,7m/ano. Rumo aos córregos, o gradiente médio calculado foi de 2% e a velocidade média de 19,5m/ano.

- Em outubro de 2005, o maior gradiente hidráulico observado foi de 20,9% entre o lago e o PM-10 (porção W) e o menor gradiente de <1% entre as equipotenciais 565/564manm na porção SE, com média de 3%. A maior velocidade observada foi de 320,3m/ano entre o lago e o PM-13 (porção SE), a menor velocidade foi de 1,3m/ano entre o PM-01 e o PM-09 (porção W), com média igual a 52,0m/ano. Rumo aos córregos, o gradiente médio calculado foi de 2% e a velocidade média de 15,2m/ano.

Os maiores gradientes hidráulicos foram observados no entorno próximo ao lago na porção W, tal fato está relacionado à menor seção transversal de fluxo observada no PM-10, aumentando o gradiente hidráulico, já que não se observou relação entre o gradiente e as condutividades hidráulicas. Mesmo apresentando maior gradiente, as maiores velocidades encontram-se no entorno próximo do lago na porção SE, devido à presença de maior condutividade hidráulica. O maior gradiente hidráulico na porção W ocorre somente em época de estiagem, sofrendo redução de aproximadamente 10 vezes no verão devido à maior recarga nas áreas não impermeabilizadas nessa época. Os menores gradientes hidráulicos foram observados rumo S/SE do lago, devido à não contribuição do lago e à ausência das zonas locais de descarga rumo leste e oeste.

A água subterrânea do aquífero raso do entorno do lago receptor de efluentes tratados sofreu impacto e está contaminada pelo boro, com concentrações acima do limite de intervenção (CETESB, 2005). Além do boro, a água subterrânea também apresenta concentrações anômalas de sódio e cloreto, porém abaixo do limite de potabilidade (MS, 2004).

O impacto foi causado devido ao descarte dos efluentes inadequadamente tratados, inserindo uma carga significativa de boro, sódio e cloreto no lago, constituindo fonte primária de contaminação pontual. Outra fonte de impacto do subsolo também foi identificada na porção SE do lago, constituída por vazamentos do sistema coletor de efluentes, composto por tubulações subterrâneas e poços coletores (PARs) subterrâneos de concreto. Tais hipóteses foram confirmadas através das seguintes comprovações:

- Altas concentrações de boro na água do lago em julho de 2003, dois meses após o cessar da fonte primária (eliminação da utilização dos óleos sintéticos contendo boro), seguida da redução de aproximadamente 95% na última campanha, dois anos e meio após o cessar da fonte primária; concomitante com altas concentrações de boro no aquífero (1,05mg/L a 1,66mg/L), e no sedimento de fundo do lago (320mg/kg a 92mg/kg).

- As maiores concentrações de boro no aquífero encontram-se no entorno próximo do lago, diminuindo no sentido do fluxo subterrâneo, até atingir a concentração de *background* na área, com valores inferiores ao limite de detecção do laboratório, que variou entre 0,05 e 0,01mg/L, em uma distância de 120m do lago.
- Paralelamente, na porção SE, observou-se altas concentrações de boro em área mais distante do lago devido a vazamento na tubulação subterrânea de efluentes comprovada pela presença de resíduos derivados de petróleo em amostras de solo de sondagens localizadas ao longo da linha de efluente industrial, próximas aos PARs 3A e 3A'.
- Altas concentrações de sódio e cloreto na água do lago, observadas também na água subterrânea. A influência do lago nas concentrações desses íons é notória na campanha de outubro de 2005 (Figura 6.23), devido a pulso recente de lançamento de efluente do lago. Além dessas considerações, tais íons presentes em altas concentrações na água do lago são constituintes das matérias primas utilizadas no tratamento de efluentes: cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ) e hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ).
- Correlação positiva entre a condutividade elétrica e os parâmetros B,  $\text{Na}^+$  e bicarbonato  $\text{HCO}_3^-$  na campanha de março de 2005, indicando que estes parâmetros aumentam a mineralização da água nesta campanha, enquanto em outubro de 2005, a CE se correlaciona positivamente com a maioria dos íons (B,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$  e  $\text{HCO}_3^-$ ), devido ao evento de lançamento do efluente próxima à data de coleta da campanha de outubro de 2005.
- Correlação positiva do  $\text{SO}_4^{2-}$  com o  $\text{Na}^+$  na campanha de março de 2005 e com o  $\text{Cl}^-$  na campanha de outubro de 2005, indicando também fonte antrópica para este ânion, confirmada pela composição da matéria prima utilizada no tratamento de efluentes: ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) e sulfato de alumínio [ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ].
- Ilhas de maiores concentrações dos íons cloreto e sódio no entorno dos poços PM-03, PM-05 e PM-12, semelhantes às ilhas de maiores concentrações do boro para a campanha de março de 2005, caracterizando ausência de lançamento de efluente próximo a essa data e áreas de menor condutividade hidráulica no entorno dos poços PM-03 e PM-05, bem como a influência da outra fonte de impacto (PAR's e tubulações subterrâneas) localizadas à montante do PM-12.

Ainda com relação ao boro é possível concluir:

- As concentrações de boro diminuem com a distância do lago, não sendo observadas em uma distância de 120m, devido ao mecanismo de adsorção e à diluição. Além de diminuir lateralmente, há uma diminuição em profundidade verificada nos poços PM-10P, PZ-02 e PZ-03, porém concentrações entre 0,8 e 0,2mg/L de boro já alcançaram a profundidade de 10m.
- Temporalmente, comparando-se as campanhas de março e outubro de 2005, as concentrações de boro no lago e as maiores concentrações no aquífero se mantiveram, indicando relativo equilíbrio químico. No entanto, observou-se um avanço da pluma caracterizado pelo aumento das concentrações em poços mais externos ao lago (PM-18, PM-15, PM-01P, PP-02 e PP-03) e diminuição relativa em poços do entorno mais próximo do lago (PM-10, PM-11 e PM-13), indicando que a pluma ainda está em movimento no sentido do fluxo.

Quanto ao comportamento geoquímico do boro pode-se concluir:

- As maiores concentrações de boro encontram-se no sedimento de fundo da porção norte, onde o lago é mais profundo e em menor proporção no solo subjacente do aquífero. As concentrações do boro em volume nos sedimentos do fundo do lago e do solo do aquífero são muito superiores àquelas observadas nas águas.
- O sedimento de fundo é constituído por areia siltosa, possuindo baixa porcentagem de argila em relação ao solo subjacente do aquífero. Apesar de o boro ser altamente adsorvido por argilas, também apresenta grande afinidade por hidróxidos, principalmente de alumínio. Portanto, os principais responsáveis pela adsorção do boro no sedimento de fundo são os hidróxidos de alumínio (gibbsita), além da caulinita.
- Apesar de as maiores concentrações de boro total ocorrerem onde os sedimentos possuem pH ácido, conteúdo de matéria orgânica baixo a alto e CTC médio a alto, o principal responsável pela maior adsorção do boro no sedimento de fundo é o pH alcalino da água do lago, segundo o próprio mecanismo de adsorção do boro.
- O fato do pH do sedimento de fundo ser muito ácido em relação ao pH da água do lago pode ser explicado pelos seguintes mecanismos: o pH ácido do sedimento de fundo pode ser resultante da ocorrência de maior degradação de matéria orgânica na interface do sedimento de fundo; enquanto que o pH alcalino do lago pode estar relacionado à alta atividade fotossintetizante do fitoplâncton, que consome os íons

H<sup>+</sup>, conferindo-lhe a característica de tamponamento, o que também explica o aumento considerável nas concentrações do íon H<sup>+</sup> no aquífero.

- Um equilíbrio químico entre os meios que contêm o boro foi alcançado após aproximadamente dois anos e meio do cessar da fonte, considerando a diminuição das concentrações de boro na água do lago e no sedimento de fundo ao longo do tempo, no entanto, não foi observado um aumento significativo das concentrações de boro no solo do aquífero e nem na água subterrânea, cujas concentrações permaneceram no geral constantes, consequência do próprio consumo da massa contaminante inicial através da adsorção no sedimento de fundo do lago e no solo ao longo do caminho da pluma no aquífero, observado na última campanha (outubro de 2005).

Quanto à caracterização hidrogeoquímica das águas, a maior parte das amostras são bicarbonatadas sódicas, com concentrações variáveis de sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) e secundariamente as amostras são classificadas entre mistas e cloretadas sódicas, também com concentrações variadas de sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>).

A caracterização espacial das variações composicionais da água para a campanha de março de 2005 demonstra que a primeira auréola delimitada a aproximadamente 20m do lago é de composição bicarbonatada sódica igual à composição do lago, a segunda auréola delimitada a aproximadamente 45m, de composição mista resultante da mistura entre a bicarbonatada sódica do lago com a cloretada sódica observada na terceira auréola, advinda provavelmente de um pulso antigo de lançamento de efluentes, que ainda não alcançou a quarta auréola novamente de composição bicarbonatada sódica, devido à diluição associada à dispersão mecânica do cloreto ao longo do fluxo.

Os processos hidrogeoquímicos que podem estar ocorrendo na zona saturada na área em estudo são: (1) ações antropogênicas identificadas através dos pulsos de lançamento de efluente no lago caracterizados pelas concentrações anômalas de cloreto, sódio e sulfato na água do lago, mais altas na campanha de outubro de 2005; (2) dispersão mecânica identificada pela diminuição das concentrações de cloreto, sobretudo na porção W mais distante do lago; (3) adsorção e dispersão mecânica identificadas pela diminuição das concentrações de boro na água do lago e na água subterrânea, sobretudo na porção W mais distante do lago; (4) troca iônica comprovada pelas baixas concentrações de cálcio na água subterrânea e altas concentrações do cálcio lixiviado nas amostras de solo.

## 8.RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se a não utilização de óleos sintéticos contendo boro para não haver novo aumento das concentrações na água subterrânea, concomitante ao cessar do lançamento de efluentes tratados no lago, visando reduzir as concentrações de sódio e cloreto na água subterrânea.

Recomenda-se a manutenção do pH alcalino do lago para não haver mobilização do boro adsorvido no sedimento de fundo para a água do lago, evitando conseqüentemente o aumento das concentrações de boro no aquífero.

Recomenda-se monitoramento inicialmente quadrimestral durante um ano hidrológico da qualidade da água do lago e do aquífero para boro e íons maiores, após instalação de poços de monitoramento a jusante dos PMs 12, 14, 15, 18 e 19.

Atividades consideradas necessárias para a melhor compreensão dos aspectos levantados na área em estudo durante o presente trabalho são sugeridas para trabalhos futuros:

- Melhor caracterização do comportamento do boro no sedimento de fundo através de extrações sequenciais do boro e ensaios (*batch tests*) com variação do pH, análises químicas dos principais óxidos nos sedimentos de fundo e no solo subjacente, análise química e mineralógica na fração argila e na fração pesada dos sedimentos de fundo e do solo subjacente, medição do Eh, pH e OD do sedimento de fundo e da interface sedimento / água *in situ*, análises químicas para íons maiores e boro na água da interface, análises químicas qualitativas em particulados utilizando-se MEV, todos os itens concomitantes com o aumento do número de pontos amostrados pelo menos para dez.
- Melhor caracterização da composição hidrogeoquímica da água subterrânea natural determinando-se o *background* local para os íons maiores (sugerindo-se o PM-57), análise química do efluente lançado para íons maiores, campanha de amostragem de água para íons maiores logo após um pulso de lançamento de efluente no lago e posteriormente mensais ao longo de um ano hidrológico na ausência de outros pulsos de lançamento, amostragem da água do lago concomitante com a água subterrânea aumentando-se o número de pontos amostrados para dez e pelo menos em duas profundidades distintas.
- Melhor caracterização hidrogeológica através da instalação de pelo menos três poços adicionais rumo sul do lago para medição de carga hidráulica geral em pelo menos duas

campanhas ao longo de um ano hidrológico e confecção de novos mapas potenciométricos.

- Aprimorar os modelos matemáticos de fluxo e transporte realizados através da validação para as campanhas de março e outubro de 2005.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACCIOLY, J.C. & NEVES, M.F.S. (1976) Determinação de boro em águas do estado do Piauí, Brasil. *Ciência Agronômica*, v. 6, n. 1-2, p. 3-5.
- ADRIANO, D.C. (1986) *Trace elements in terrestrial environment*. New York, Springer – Verlag. 533p.
- ALMEIDA, F.F.M. de; BRITO NEVES, B.B.; FUCK, R.A.; HASUI, Y. (1977) Províncias estruturais brasileiras. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 8., Campina Grande, 1977. *Atas*. Campina Grande, SBG, p. 363-391.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1997) Construção de poços de monitoramento e amostragem. NBR 13895/97.
- BARBER, L.B.; THURMAN, E.M.; SCHROEDER, M.P.; LE BLANC, D.R. (1988) Long-term fate of organic micropollutants in sewage-contaminated groundwater. *Environmental Science and Technology*, v. 22, p. 205-211.
- BIGGAR, J. W. & FIREMAN, M. (1960) Boron adsorption and release by soils. *Soil Science Society of America Proceedings*, v. 24, p. 115-120.
- BINGHAM, F.T.; PAGE, A.L.; COLEMAN, N.T.; FLACH, K. (1971) Boron adsorption characteristics of selected amorphous soils from Mexico and Hawaii. *Soil Science Society of America Proceedings*, v. 35, p. 546-550.
- BONACIN SILVA, A.L. (2001) *Caracterização ambiental e estudo do comportamento do chumbo, zinco e boro em área degradada por indústrias cerâmicas – região dos lagos de Santa Gertrudes, SP*. São Paulo, 229p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- BOUWER, H. & RICE, R.C. (1976) A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. *Water Resources Research*, v. 12, p. 423-428.
- MINISTÉRIO DA SAÚDE (2004) *Norma de qualidade da água para consumo humano*. In: Diário Oficial da União. Brasília, DO/IN. Ano CXLI, n. 59, p. 266-270.
- BROOKINS, D.G. (1988) *Eh-pH diagrams for geochemistry*. New York, Springer – Verlag. 176p.
- BUNDSCHUH, J.; FUERTES, A.; BAUDINO, G.; GARCIA, R.; BALKE, K.-D. (1994) Investigation and modelling transport and adsorption of boron in the groundwater of Lerma Valley, Argentina. *Hydrological Chemical and Biological Processes of Transformation and Transport of Contaminants in Aquatic Environments*, v. 219, p. 185-193.

- CARNEIRO, C.D.R.; HASUI, Y.; GIANCURSI, F.D. (1976) Estrutura da Bacia de Taubaté na região de São José dos Campos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 29., Ouro Preto, 1976. *Anais*. Ouro Preto, SBG, v.4, p. 247-256.
- COMMUNAR, G.; KEREN, R.; LI, F. (2004) Deriving boron adsorption isotherms from soil column displacement experiments. *Soil Science Society of America Journal*, v. 68, p. 481-488.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (1998) *Relatório de qualidade das águas subterrâneas do Estado de São Paulo*. São Paulo, CETESB. 106p.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (1999) *Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas*. São Paulo, CETESB - GTZ. 385p.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (2001) *Relatório de estabelecimento de valores orientadores para solos e águas subterrâneas no Estado de São Paulo*. São Paulo, CETESB. 247p.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (2004) *Áreas Contaminadas no Estado de São Paulo*. São Paulo, CETESB. 1336p. URL <http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/relatorios.asp>
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (2005) *Valores orientadores para solos e águas subterrâneas do Estado de São Paulo*. In: DIÁRIO OFICIAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (2005) São Paulo, DO/IO, v. 115, n. 225, p. 48. (Poder Executivo, Seção I).
- CORWIN D.L. (1986) A one-dimension model of chemical diffusion and sorption in saturated soil and aquatic systems. *Journal of Environmental Quality*, v. 15, p. 173-182.
- COUCH E.L. & GRIM R.E. (1968) Boron fixation by illites. *Clays and Clay Minerals*, v. 16, p. 249-256.
- COX J.A.; LUNDQUIST G.L.; PRZYJAZNY A.; SCHMULBACH C.D. (1978) Leaching of boron from coal ash. *Environmental Science and Technology*, v. 12, p. 722-723.
- CUSTÓDIO, E.G. & LLAMAS, M.R. (1976) *Hidrologia subterrânea*. Barcelona, Omega, v. 2. 1157p.
- DAVIS, J.C. (1986) *Statistics and data analysis in geology*. New York, Wiley. 646p.

- DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA DO ESTADO DE SÃO PAULO (1977) *Estudo de águas subterrâneas, região administrativa III e faixa litorânea - São José dos Campos*. São Paulo, DAEE / ENCO. v. 3.
- ELRASHIDI M.A. & O'CONNOR G.A. (1982) Boron sorption and desorption in soils. *Soil Science Society of America Journal*, v. 46, p. 27-31.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. (1979) *Manual de métodos de Análise de solo*. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de solos. Rio de Janeiro, s. ed.
- FRANGIPANI, A. & PANNUTI, E.L. (1965) *Estudos hidrogeológicos na Bacia de Taubaté, entre Jacaré e Quiririm*. Boletim do Instituto Geográfico e Geológico de São Paulo, v. 42. 126 p.
- GOLDBERG, S. & GLAUBIG, R.A. (1985) Boron adsorption on aluminium and iron oxide minerals. *Soil Science Society of America Journal*, v. 49, p. 1374-1379.
- GOLDBERG, S. & GLAUBIG, R.A. (1986a) Boron adsorption and silicon release by the clay minerals kaolinite, montmorillonite, and illite. *Soil Science Society of America Journal*, v. 50, p. 1442-1448.
- GOLDBERG, S. & GLAUBIG, R.A. (1986b) Boron adsorption on California soils. *Soil Science Society of America Journal*, v. 50, p. 1173-1176.
- GOLDBERG, S.; FORSTER, H.S.; HEICK, E.L. (1993) Boron adsorption mechanisms on oxides, clay minerals, and soils inferred from ionic strength effects. *Soil Science Society of America Journal*, v. 57, p. 704-708.
- GOLDBERG, S.; FORSTER, H.S.; LESCH, S.M.; HEICK, E.L. (1996) Influence of anion competition on boron adsorption by clays and soils. *Soil Science*, v. 161, p. 99-103.
- GOLDBERG, S.; LESCH, S.M.; SUAREZ, D.L. (2000) Predicting boron adsorption by soils using soil chemical parameters in the constant capacitance model. *Soil Science Society of America Journal*, v. 64, p. 1356-1363.
- GRIFFIN, R.A. & BURAU, R.G. (1974) Kinetic equilibrium studies of boron desorption from soil. *Soil Science Society of America Proceedings*, v. 38, p. 892-897.
- GUPTA, U.C.; JAME, Y.W.; CAMPBELL, C.A.; LEYSHON, A.J.; NICHOLAICHUK, W. (1985) Boron toxicity and deficiency: a review. *Canadian Journal of Soil Science*, v. 65, p. 381-409.
- HASUI, Y.; PONÇANO, W.L.; BISTRICHI, C.A.; STEIN, D.P.; GALVÃO, C.A.C.F.; GIMENEZ, A.F.; ALMEIDA, M.A.; PIRES NETO, A.G.; MELO, M.S. de; SANTOS, M.C.S.R. dos

- (1978a) *Geologia da região administrativa III (Vale do Paraíba) e parte da região administrativa II (Litoral) do Estado de São Paulo*. São Paulo, IPT.
- HASUI, Y. & PONÇANO, W.L. (1978) Organização estrutural e evolução da Bacia de Taubaté. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30., Recife, 1978. *Anais*. Recife, SBG, v. 1, p. 368-381.
- HASUI, Y. (1982) The Mantiqueira Province: archean and proterozoic evolution. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 12, p. 167-171.
- HATCHER, J.T. & BOWER, C.A. (1958) Equilibria and dynamics of boron adsorption by soils. *Soil Science*, v. 85, p. 319-323.
- HOLLIS, J.F.; KEREN, R.; GAL, M. (1988) Boron release and sorption by fly ash as affected by pH and particle size. *Journal of Environmental Quality*, v. 17, p. 181-184.
- HOUNSLOW, A.W. (1994) *Water quality data: analysis and interpretation*. Boca Raton, CRC Press/Lewis Publishers. 397p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (2000) *Censo demográfico do Brasil 2000*. URL <http://www.ibge.gov.br>
- INSTITUTO GEOGRÁFICO CARTOGRÁFICO (1978) *Planta Topográfica do Plano Cartográfico do Estado de São Paulo - Folha SF-23-Y-D-11-2-NE-A*, (escala 1 : 10.000).
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (1978) *Geologia da região administrativa III (Vale do Paraíba) e parte da região administrativa II (Litoral) do estado de São Paulo*. Livro texto e mapa geológico. São Paulo, IPT. 78p. (escala 1 : 200.000).
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (1981) *Mapa geológico do Estado de São Paulo*. Folha 2. São Paulo, IPT. (escala 1 : 500.000).
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (1990) *Geologia das folhas Jacareí (SF.23-Y-D-II-3), Tremembé (SF.23-Y-B-V-4), Taubaté (SF.23-Y-D-II-2) e Pindamonhangaba (SF.23-Y-B-VI-3)*, escala 1 : 50.000, Estado de São Paulo. São Paulo, IPT.
- JASMUND, K. & LINDNER, B. (1973) Experiments on the fixation of boron by clay minerals. *Proceedings of the International Clay Conference*, 1972, p. 399-412.
- JOHNSON, A.I. (1967) Specific yield – Compilation of specific yields for various materials. *United States Geological Survey Water-Supply Paper*, 1662-D.

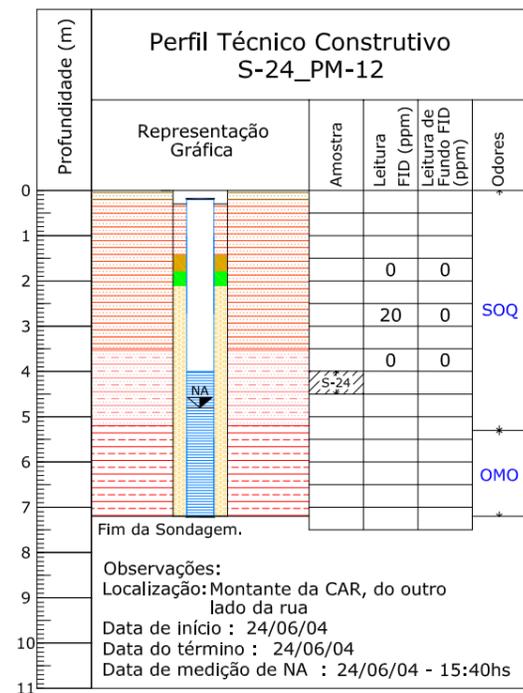
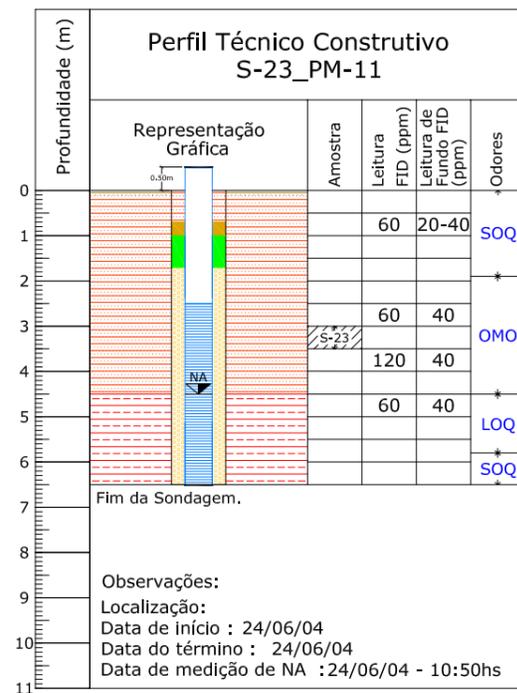
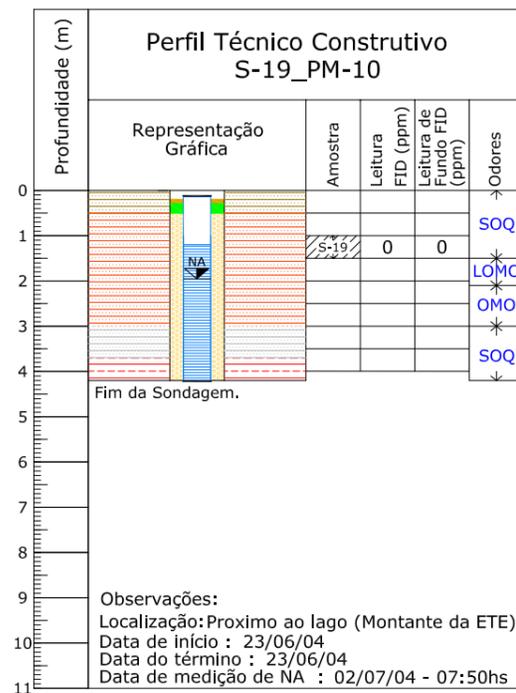
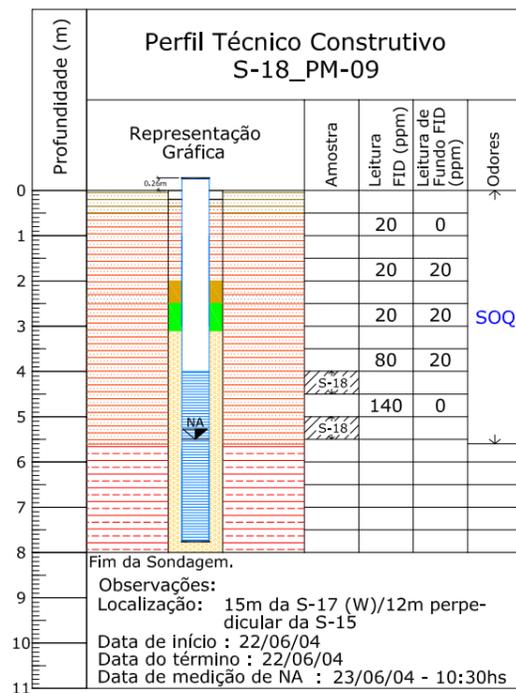
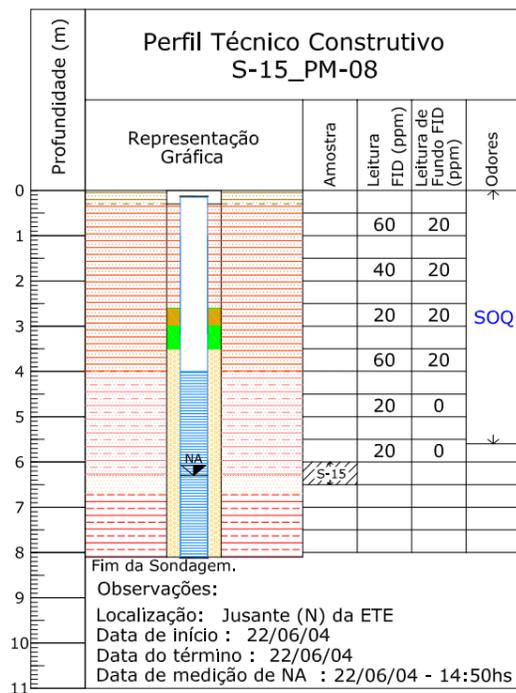
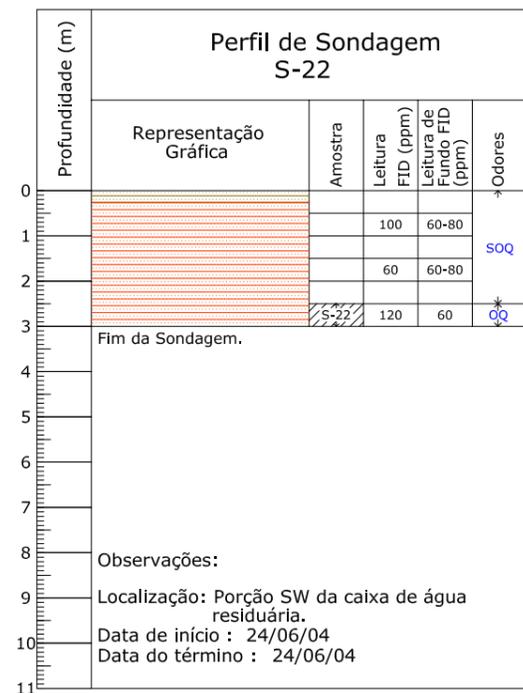
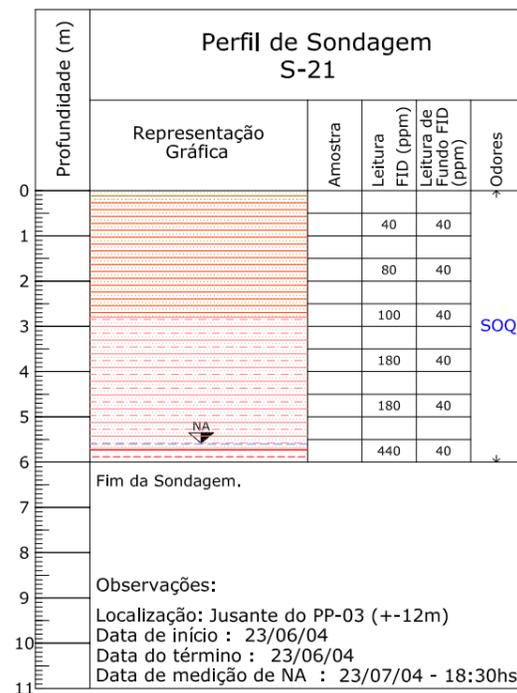
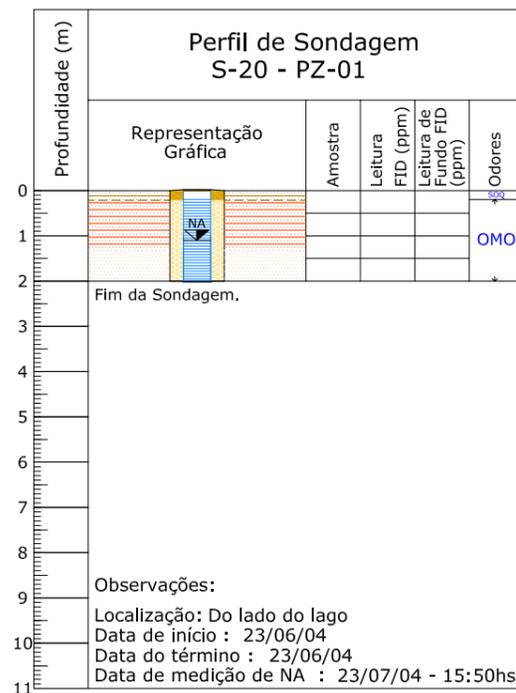
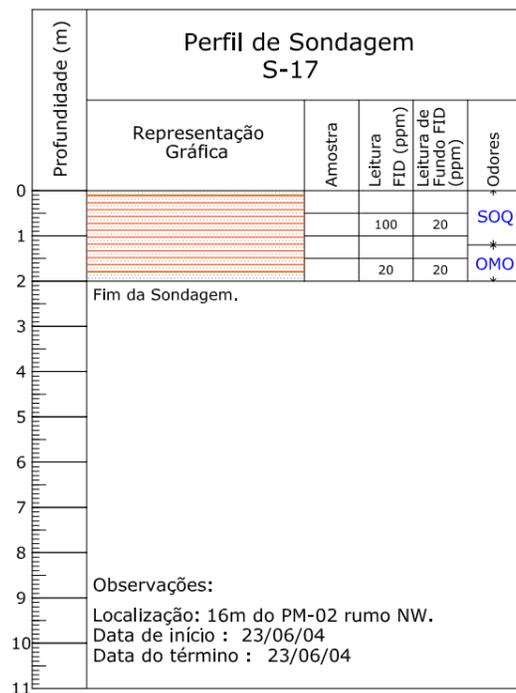
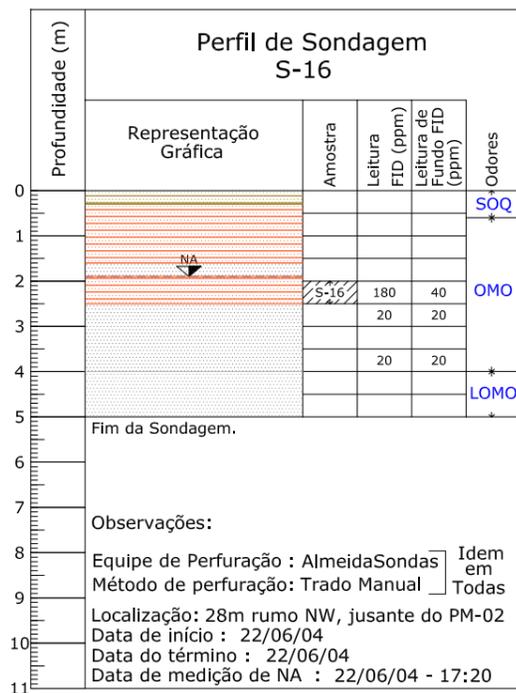
- KEREN, R. & BINGHAM, F.T. (1985) Boron in water, soils, and plants. *Advances in Soils Sciences*, v. 1, p. 229-276.
- KEREN, R. & MEZUMAN, U. (1981) Boron adsorption by clay minerals using a phenomenological equation. *Clays and Clay Minerals*, v. 29, p. 198-204.
- KEREN, R.; GAST, R.G.; BAR-YOSEF, B. (1981) pH-dependent boron adsorption by Namontmorillonite. *Soil Science Society of America Journal*, v. 45, p. 45-48.
- KEREN, R. & TALPAZ, H. (1984) Boron adsorption by montmorillonite as affected by particle size. *Soil Science Society of America Journal*, v. 48, p. 555-559.
- MARZADOORI, C.; ANTISARI, L.V.; CIAVATTA, C.; SEQUI, P. (1991) Soil organic matter influence on adsorption and desorption of boron. *Soil Science Society of America Journal*, v. 55, p. 1582-1585.
- MERCK, E. (1990) *Determinación colorimétrica y fotométrica de boro con curcumina*. 4p.
- MOORE, J.W. (1989) *Inorganic contaminants of surface water: research and monitoring priorities*. New York, Springer-Verlag. 334 p.
- OKAZAKI, E. & CHAO, T.T. (1968) Boron adsorption and desorption by some Hawaiian soils. *Soil Science*, v. 105, p. 255-259.
- PARISOT, E.H.; GUIGUER JR., N.; REBOUÇAS, A.C.; CABRAL JR., D.; DUARTE, U. (1985) Monitoramento das águas subterrâneas adjacentes ao aterro sanitário de Taubaté (SP) – primeiros resultados. *Boletim do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (série científica)*, v. 16, p. 32-45.
- PINHEIRO, C.H.R. (2001) *Análise de diferentes fatores na disposição de metais pesados em sedimentos lacustres no Parque Ecológico do Tietê*. São Paulo, 134p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- RAIJ, B.VAN; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M.E.; LOPES, A.S.; BATAGLIA, O.C. (1987) *Análise de solos para fins de fertilidade*. Campinas, Fundação Cargill, 1987. 170p.
- REIMANN, C. & CARITAT, P.de (1998) *Chemical elements in the environment: factsheets for the geochemist and environmental scientist*. Berlim, Springer-Verlag. 397p.
- RHOADES, J.D.; INGVALSON, R.D.; HATCHER, J.T. (1970) Laboratory determination of leachable soil boron. *Soil Science Society of America Proceedings*, v. 34, p. 871-875.

- RICCOMINI, C. (1989) *O rift continental do sudeste do Brasil*. São Paulo, 256p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- ROSS, J.L.S.; MOROZ, I.C. (1977) *Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo*. São Paulo, Laboratório de Geomorfologia, DG/FFLCH/USP / Laboratório de Cartografia Geotécnica, IPT/FAPESP, v.1. (escala 1 : 500.000).
- SCHOU, J.S.; JANSEN, J.A.; AGGERBECK, B. (1984) Human pharmacokinetics and safety of boric acid. *Archives of Toxicology*, v. 7 (Suppl), p. 232-235.
- SIMS, J.R. & BINGHAM, F.T. (1967) Retention of boron by layer silicates, sesquioxides and soil materials I. Layer silicates. *Soil Science Society of America Proceedings*, v. 31, p. 728-731.
- SIMS, J.R. & BINGHAM, F.T. (1968) Retention of boron by layer silicates, sesquioxides and soil materials II. Sesquioxides. *Soil Science Society of America Proceedings*, v. 32, p. 364-369.
- SIMSIMAN, G.V.; CHESTERS, G.; ANDREN, A.W. (1987) Effect of ash disposal ponds on groundwater quality at a coal-fired power plant. *Water Research*, v. 21, p. 417-426.
- SPOSITO, G. (1989) *The chemistry of soils*. New York, Oxford Press. 277p.
- STUMM, W. & SCHONOR, J.L. (1995) Atmospheric depositions: impact of acids on lakes. In: LERMAN, A.; IMBODEN, D.M.; GAT, J.R., eds. *Physics and Chemistry of Lakes*. 2<sup>a</sup> ed. New York, Springer-Verlag. p. 185-215.
- STUMM, W. & MORGAN, J.J. (1996) *Aquatic chemistry*. New York, John Wiley & Sons. 1022p.
- SUGUIO, K. (1973) Determinação das propriedades das rochas sedimentares em laboratório. In: *Introdução à sedimentologia*. São Paulo, Edgard Blucher. p. 26-175.
- THOMPSON, J.A.J.; DAVIS, J.C.; DREW, R.E. (1976) Toxicity, uptake and survey studies of boron in the marine environment. *Water Research*, v. 10, p. 869-875.
- U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1985) Practical guide for groundwater sampling. [Postscript file]. URL <http://www.epa.gov/swerust1/cat/pracgw.pdf>
- U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1994) Integrated Risk Information System. URL <http://www.epa.gov/iris/>
- U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (2004) Method study 37 - SW-846 method 3050, acid digestion of sediments, sludges and soils by AA-direct aspiration. URL [http://cfpub.epa.gov/si/osp\\_sciencedisplay.cfm?dirEntryID=30330&ref\\_site=SI&keywords=S](http://cfpub.epa.gov/si/osp_sciencedisplay.cfm?dirEntryID=30330&ref_site=SI&keywords=S)  
OILS

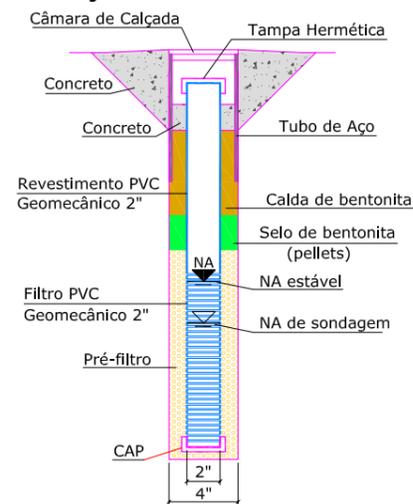
- U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (2004) Interlaboratory study of inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy method 6010 and digestion method 3050. URL [http://cfpub.epa.gov/si/osp\\_sciencedisplay.cfm?dirEntryID=37444&ref\\_site=SI&keywords=SOILS](http://cfpub.epa.gov/si/osp_sciencedisplay.cfm?dirEntryID=37444&ref_site=SI&keywords=SOILS)
- WAGOTT, A. (1969) An investigation of the potential problem of increasing boron concentrations in rivers and water courses. *Water Research*, v. 3, p. 749-765.
- WALKER, C.T. (1975) Geochemistry of boron. *Benchmark Papers in Geology*, v. 23, 414p.
- WASHINGTON STATE DEPARTMENT OF ECOLOGY (2006) A citizen's guide to understanding and monitoring lakes and streams. URL <http://www.ecy.wa.gov/programs/wq/plants/management/joysmanual/ph.html>
- WOODS, W.G. (1994) An introduction to boron: history, sources, users and chemistry. *Environmental Health Perspectives*, v. 102 (suppl: 7), p. 5-11.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (1998) *Environmental Health Criteria 204-Boron*. Geneva, WHO, 201p.

## 10. ANEXOS

**ANEXO I**  
**PERFIS DESCRITIVOS DAS SONDAGENS E POÇOS**  
**DE MONITORAMENTO (2004)**



#### Poço de Monitoramento:



#### Legenda de Solo:

- Aterro de solo areno argiloso, por vezes arenoso (areia mal selecionada) com argila, friável a moderadamente compacto, com raízes e britas, predominantemente marrom, laranja, marrom alaranjado, preto e marrom escuro.
- Aterro de solo argilo-arenoso com silte (areia fina a grossa), pouco compacto a compacto. Observa-se grânulos de quartzo esparsos, muito angulosos a subarredondados e pedriscos de quartzo e argila. Em porções pouco profundas, pode apresentar raízes e britas. Coloração predominante laranja ou laranja/ocre, laranja avermelhado e marrom alaranjado.
- Camada de areia de fundição composta por areia fina a grossa, predominante grossa, com argila, friável a mole, por vezes com matéria orgânica, de coloração preta e cinza escura, apresentando britas centimétricas a decimétricas, pedaços de vidro, metal e borracha; escória de fundição.
- Argila silto arenosa (areia fina a muito fina), pouco compacta a compacta, com grânulos de quartzo esparsos, angulosos a subarredondados, predominantemente vermelha, com pigmentos ocre, róseos, beges e brancos (variada). Pode-se apresentar também alaranjada e castanha acinzentada.
- Argila arenosa, compacta a mole, com intercalações decimétricas de areia mal selecionada, por vezes cascalhosa, com grânulos e até seixos centimétricos de quartzo esparsos na matriz, subarredondados a angulosos, com coloração cinza clara e bege.
- Areia fina a muito grossa, mal selecionada, com grãos subangulosos a subarredondados, por vezes siltosa e/ou argilosa, friável, com grânulos e seixos angulosos a subarredondados, predominantemente cinza clara, secundariamente bege, laranja e amarela.
- Argila siltosa, compacta a muito compacta, apresenta em algumas porções, intercalações centimétricas de areia mal selecionada (fina a grossa) argilosa a siltosa, predominantemente cinza clara e vermelha com pigmentos cinza, branco, ocre e bege.

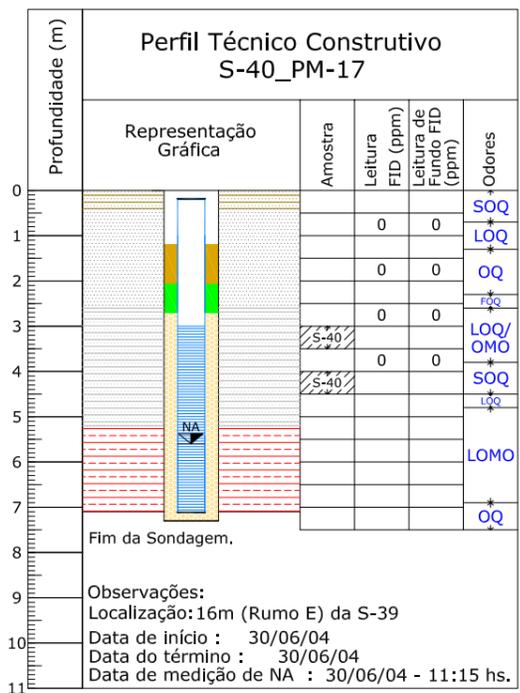
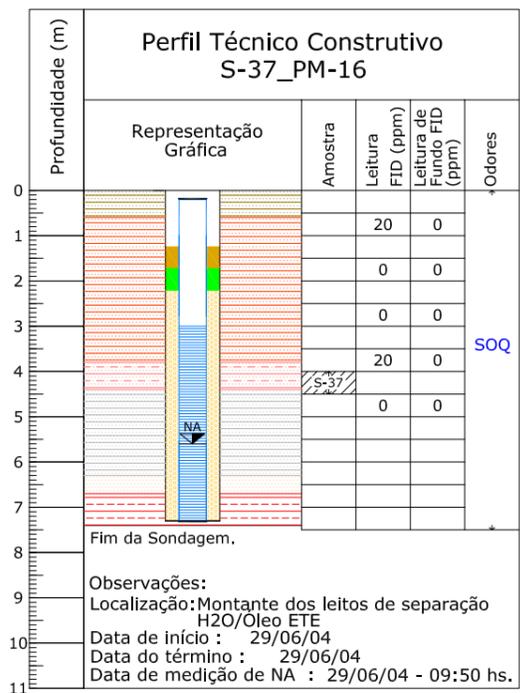
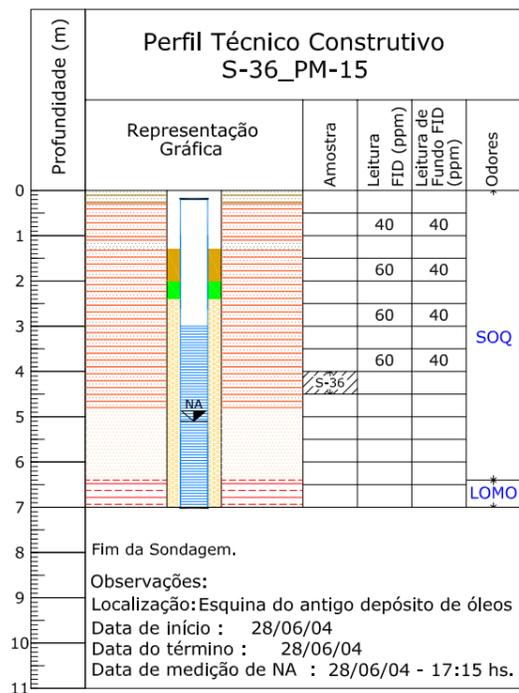
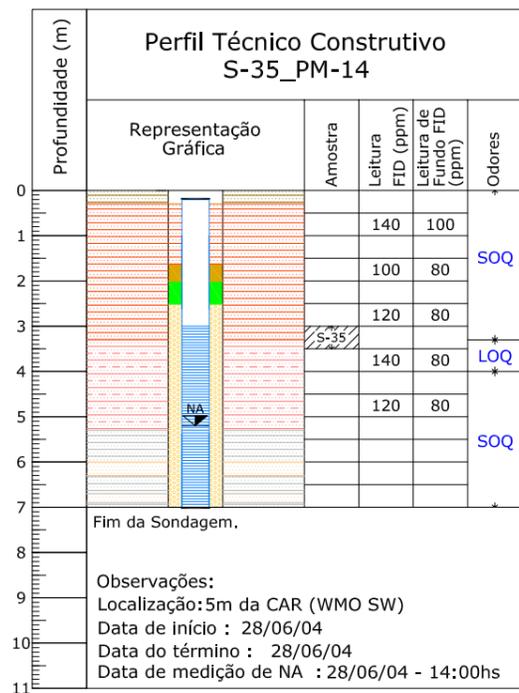
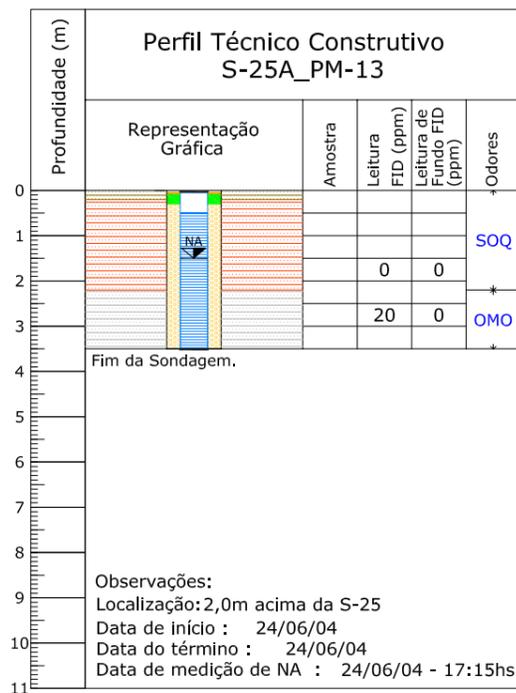
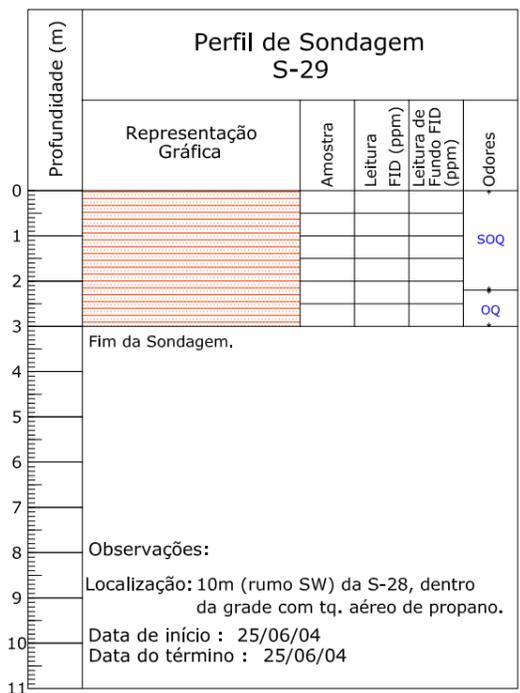
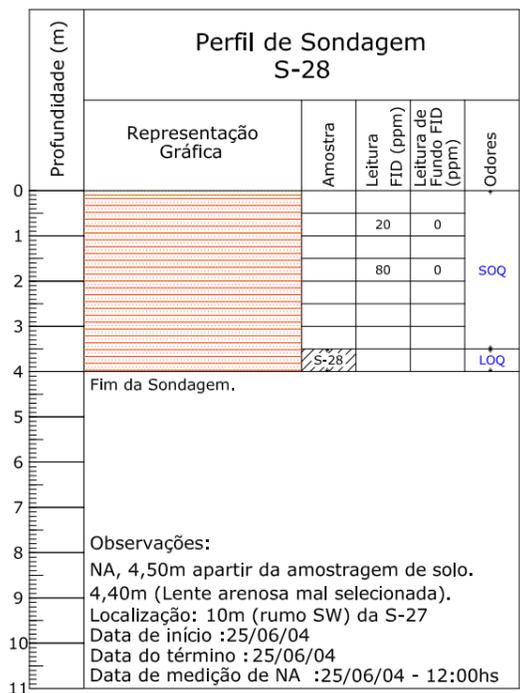
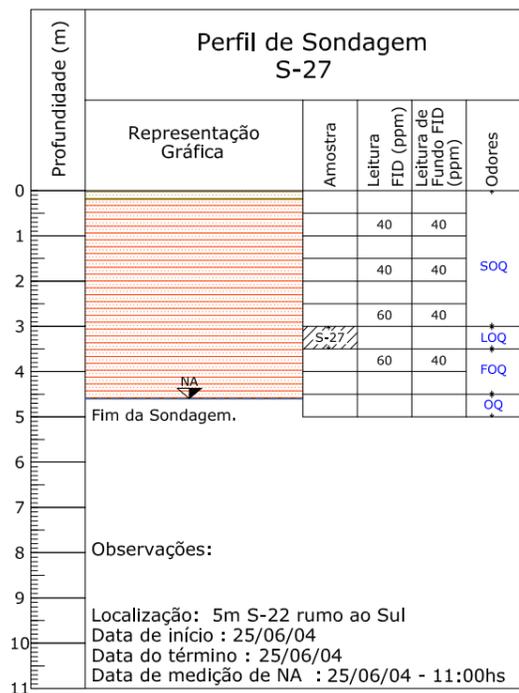
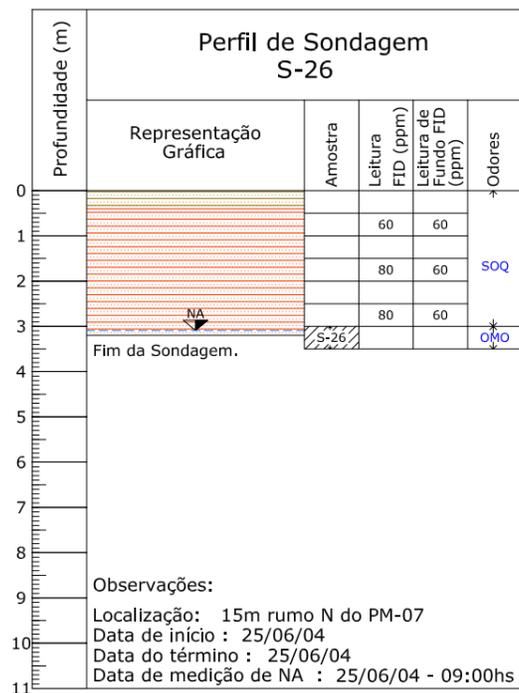
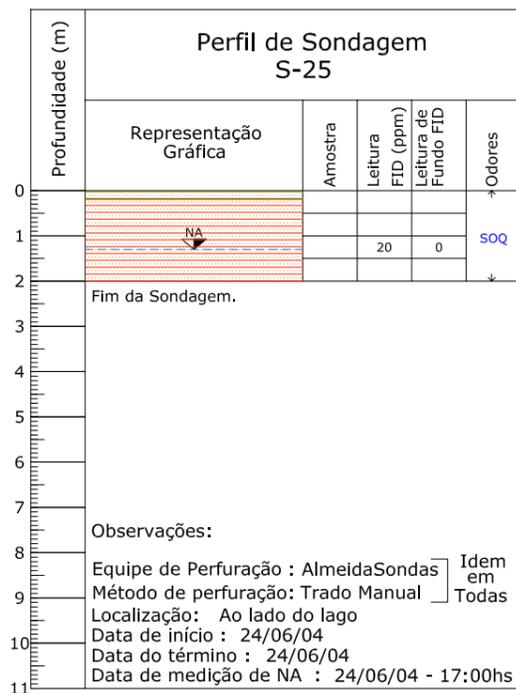
- #### Legenda de Odor:
- QO = Odor Químico
  - SOQ = Sem Odor Químico
  - OMO = Odor de Mat. Orgânica
  - LOMO = Leve Odor de Mat. Orgân.

## Perfis Geológicos

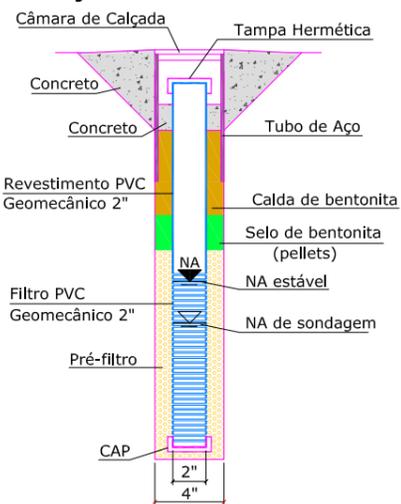
Local Parque das Indústrias Taubaté, Brasil

Projeto Tese de Mestrado

Data :	Doc. ref.:	Edição : Arquivo :	Desenho :
26/07/2005	Tese de Mestrado 01	Perfis Geológicos	Tavares.T



#### Poço de Monitoramento:



#### Legenda de Solo:

- Aterro de solo areno argiloso, por vezes arenoso (areia mal selecionada) com argila, friável a moderadamente compacto, com raízes e britas, predominantemente marrom, laranja, marrom alaranjado, preto e marrom escuro.
- Aterro de solo argilo-arenoso com silte (areia fina a grossa), pouco compacto a compacto. Observa-se grânulos de quartzo esparsos, muito angulosos a subarredondados e pedriscos de quartzo e argila. Em porções pouco profundas, pode apresentar raízes e britas. Coloração predominante laranja ou laranja/ocre, laranja avermelhado e marrom alaranjado.
- Camada de areia de fundição composta por areia fina a grossa, predominante grossa, com argila, friável a mole, por vezes com matéria orgânica, de coloração preta e cinza escura, apresentando britas centimétricas a decimétricas, pedaços de vidro, metal e borracha; escória de fundição.

- Argila silto arenosa (areia fina a muito fina), pouco compacta a compacta, com grânulos de quartzo esparsos, angulosos a subarredondados, predominantemente vermelha, com pigmentos ocre, róseos, beges e brancos (variegada). Pode-se apresentar também alaranjada e castanha acinzentada.
- Argila arenosa, compacta a mole, com intercalações decimétricas de areia mal selecionada, por vezes cascalhosa, com grânulos e até seixos centimétricos de quartzo esparsos na matriz, subarredondados a angulosos, com coloração cinza clara e bege.
- Areia fina a muito grossa, mal selecionada, com grãos subangulosos a subarredondados, por vezes silteosa e/ou argilosa, friável, com grânulos e seixos angulosos a subarredondados, predominantemente cinza clara, secundariamente bege, laranja e amarela.
- Argila siltosa, compacta a muito compacta, apresenta em algumas porções, intercalações centimétricas de areia mal selecionada (fina a grossa) argilosa a silteosa, predominantemente cinza clara e vermelha com pigmentos cinza, branco, ocre e bege.

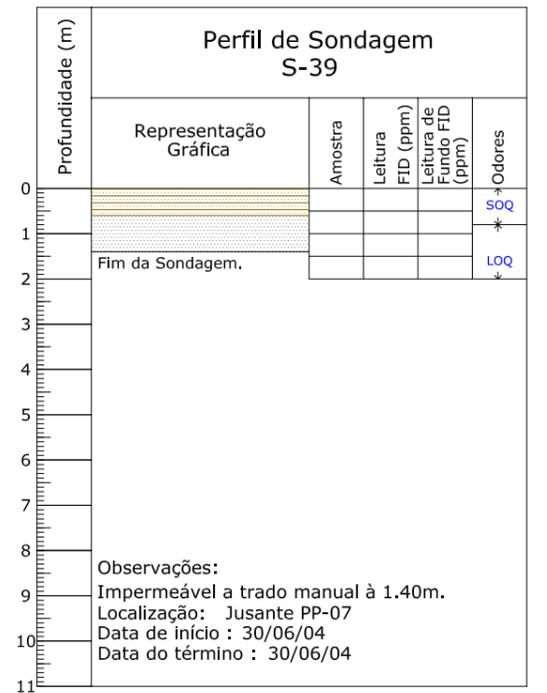
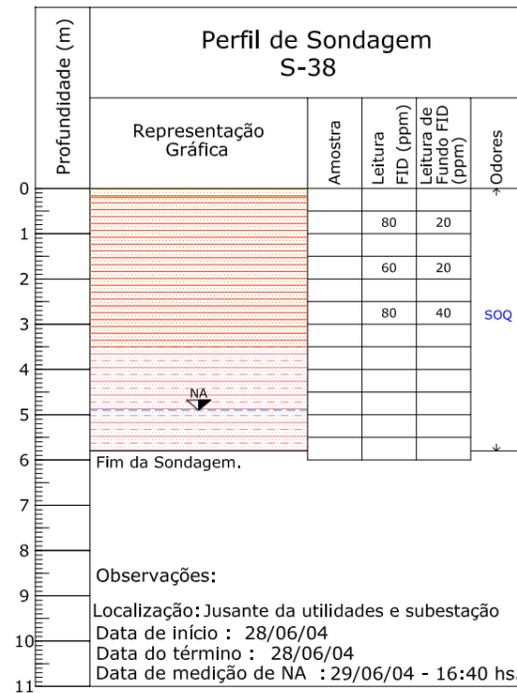
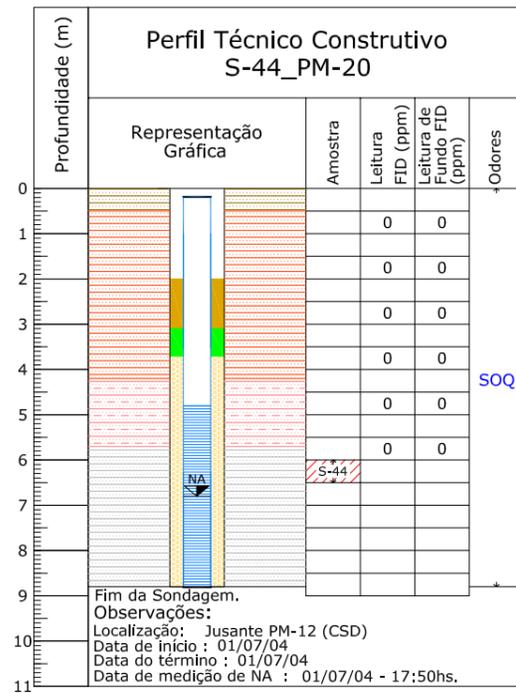
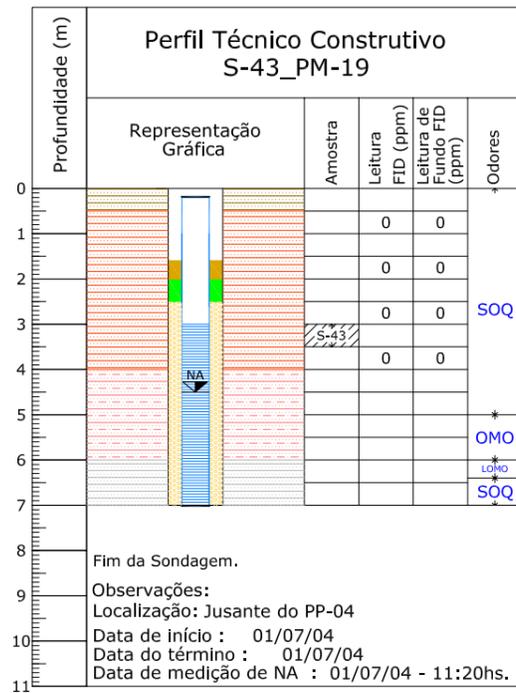
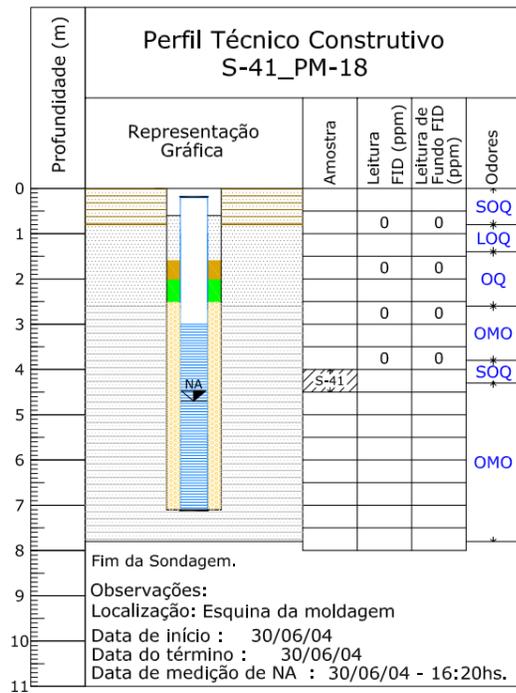
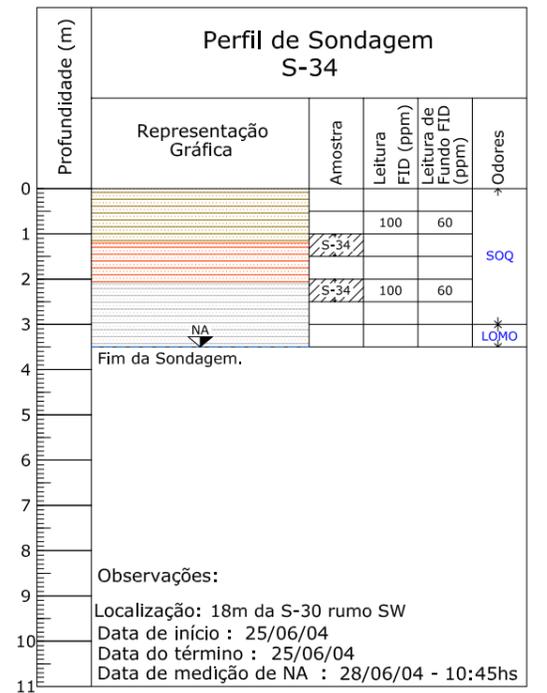
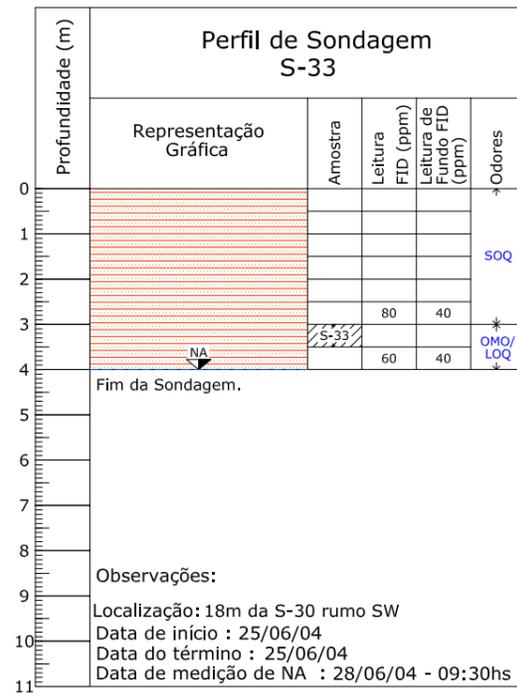
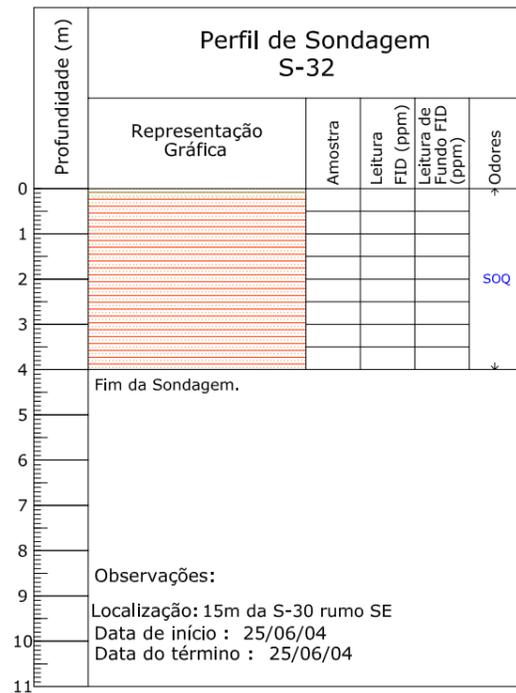
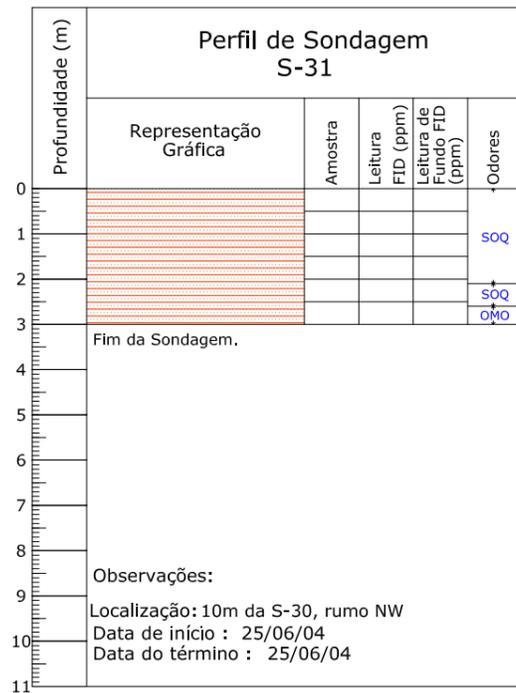
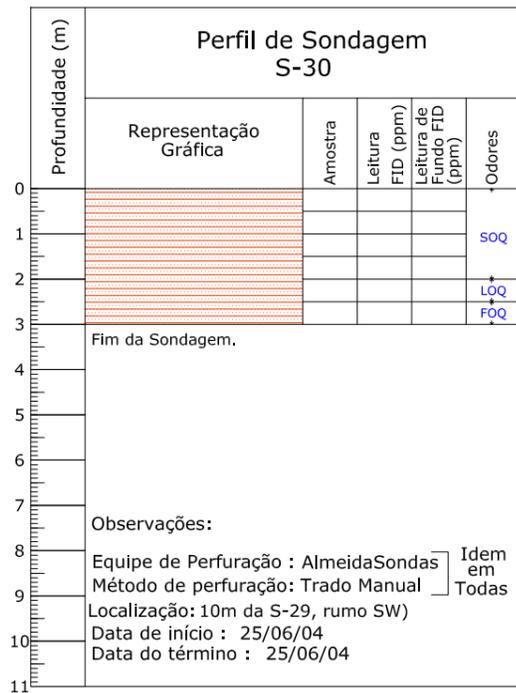
- #### Legenda de Odor:
- OQ = Odor Químico
  - SOQ = Sem Odor Químico
  - OMO = Odor de Mat. Orgânica
  - LOMO = Leve Odor de Mat. Orgân.

#### Perfis Geológicos

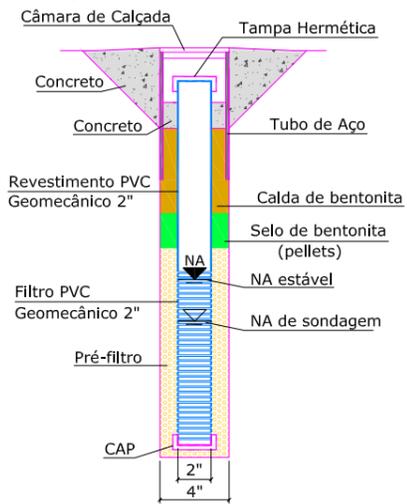
Local Parque das Indústrias Taubaté , Brasil

Projeto Tese de Mestrado

Data : 26/07/2006 Doc. ref.: Tese de Mestrado 01 Edição :Arquivo : Perfis Geológicos Desenho : Tavares.T



#### Poço de Monitoramento:



#### Legenda de Solo:

- Aterro de solo areno argiloso, por vezes arenoso (areia mal selecionada) com argila, friável a moderadamente compacto, com raízes e britas, predominantemente marrom, laranja, marrom alaranjado, preto e marrom escuro.
- Aterro de solo argilo-arenoso com silte (areia fina a grossa), pouco compacto a compacto. Observa-se grânulos de quartzo esparsos, muito angulosos a subarredondados e pedriscos de quartzo e argila. Em porções pouco profundas, pode apresentar raízes e britas. Coloração predominante laranja ou laranja/ocre, laranja avermelhado e marrom alaranjado.
- Camada de areia de fundição composta por areia fina a grossa, predominante grossa, com argila, friável a mole, por vezes com matéria orgânica, de coloração preta e cinza escura, apresentando britas centimétricas a decimétricas, pedaços de vidro, metal e borracha; escória de fundição.
- Argila silto arenosa (areia fina a muito fina), pouco compacta a compacta, com grânulos de quartzo esparsos, angulosos a subarredondados, predominantemente vermelha, com pigmentos ocres, róseos, beges e brancos (variegada). Pode-se apresentar também alaranjada e castanha acinzentada.
- Argila arenosa, compacta a mole, com intercalações decimétricas de areia mal selecionada, por vezes cascalhosa, com grânulos e até seixos centimétricos de quartzo esparsos na matriz, subarredondados a angulosos, com coloração cinza clara e bege.
- Areia fina a muito grossa, mal selecionada, com grãos subangulosos a subarredondados, por vezes siltosa e/ou argilosa, friável, com grânulos e seixos angulosos a subarredondados, predominantemente cinza clara, secundariamente bege, laranja e amarela.
- Argila siltosa, compacta a muito compacta, apresenta em algumas porções, intercalações centimétricas de areia mal selecionada (fina a grossa) argilosa a siltosa, predominantemente cinza clara e vermelha com pigmentos cinza, branco, ocre e bege.

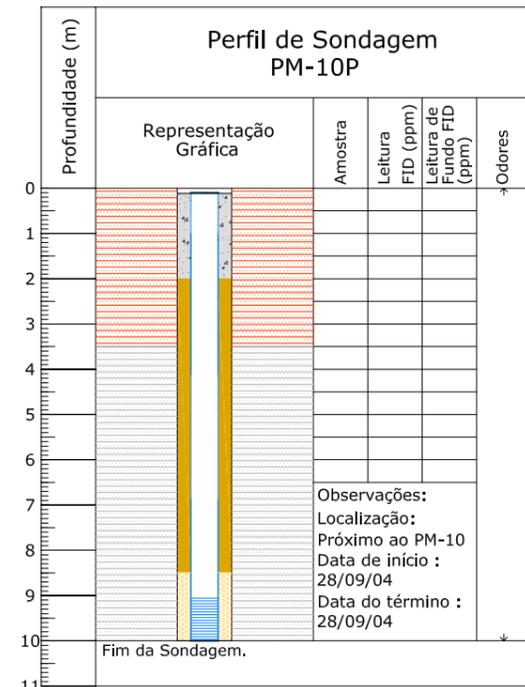
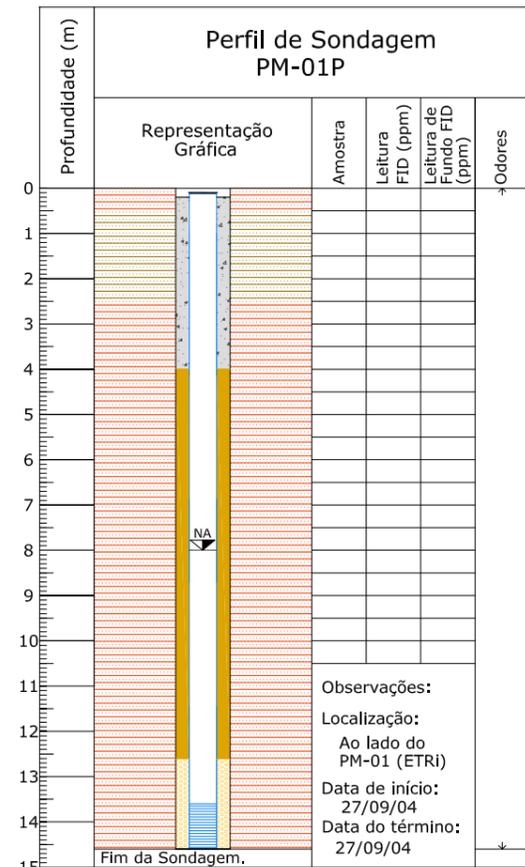
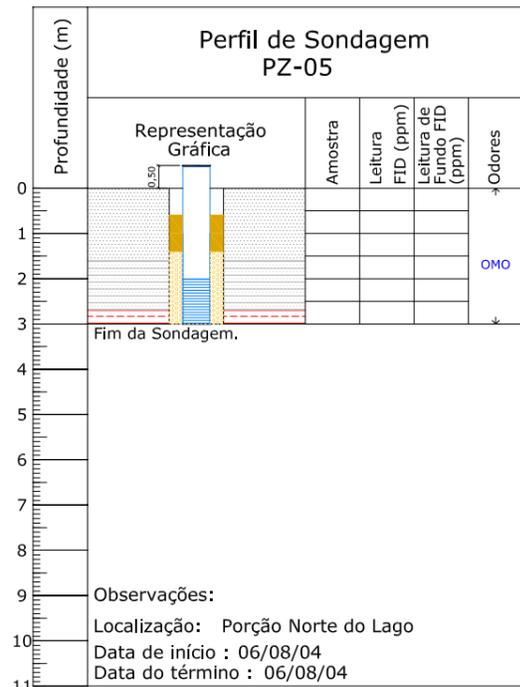
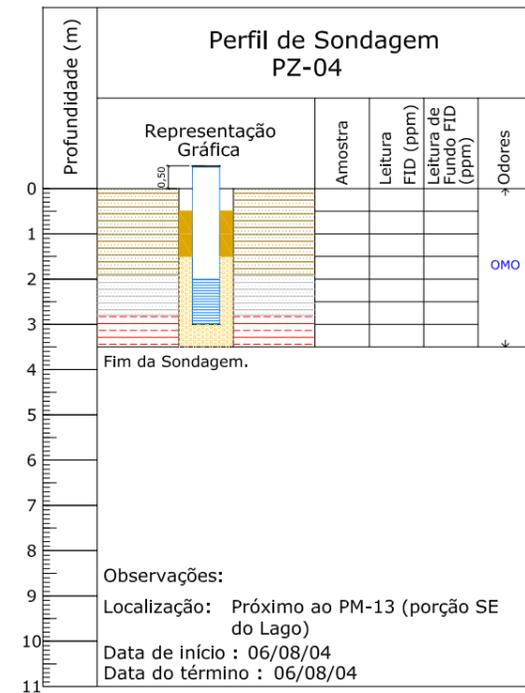
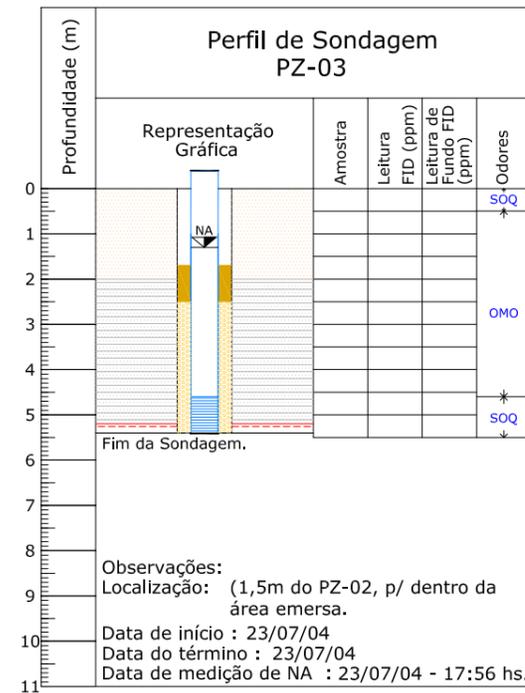
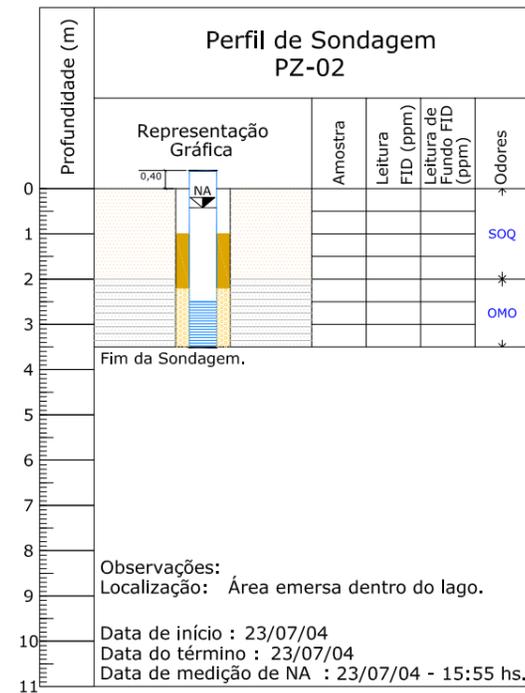
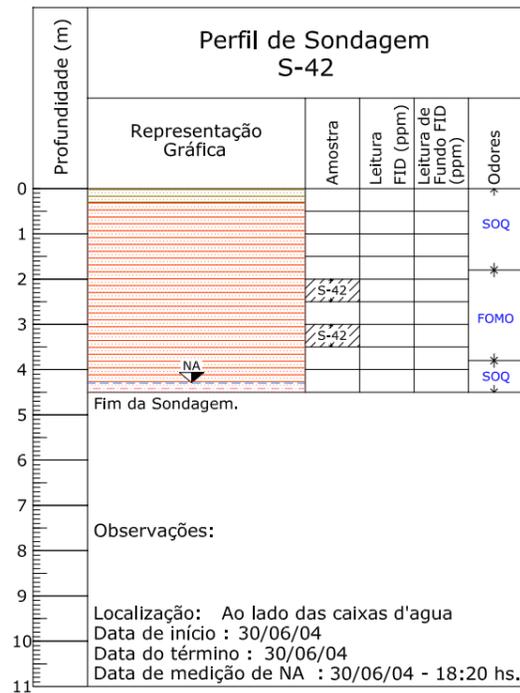
- #### Legenda de Odor:
- OQ = Odor Químico
  - SOQ = Sem Odor Químico
  - OMO = Odor de Mat. Orgânica
  - LOMO = Leve Odor de Mat. Orgân.

#### Perfis Geológicos

Local Parque das Indústrias Taubaté, Brasil

Projeto Tese de Mestrado

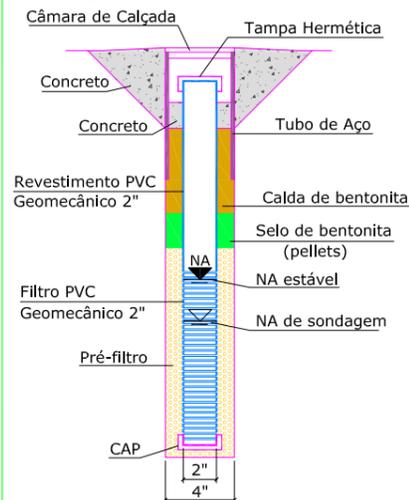
Data : 26/07/2004	Doc. ref. : Tese de Mestrado 01	Edição : Arquivo :	Desenho : Tavares.T
-------------------	---------------------------------	--------------------	---------------------



#### Legenda de Solo:

- Aterro de solo areno argiloso, por vezes arenoso (areia mal selecionada) com argila, friável a moderadamente compacto, com raízes e britas, predominantemente marrom, secundariamente laranja, marrom alaranjado, preto e marrom escuro.
- Aterro de solo argilo-arenoso com silte (areia fina a grossa), pouco compacto a compacto. Observa-se grânulos de quartzo esparsos, muito angulosos a subarredondados e pedriscos de quartzo e argila. Em porções pouco profundas, pode apresentar raízes e britas. Coloração predominante laranja ou laranja/ocre, laranja avermelhado e marrom alaranjado.
- Camada de areia de fundição composta por areia fina a grossa, predominante grossa, com argila, friável a mole, por vezes com matéria orgânica, de coloração preta e cinza escura, apresentando britas centimétricas a decimétricas, pedaços de vidro, metal e borracha; escória de fundição.
- Argila silto arenosa (areia fina a muito fina), pouco compacta a compacta, com grânulos de quartzo esparsos, angulosos a subarredondados, predominantemente vermelha, com pigmentos ocre, róseos, beges e brancos (variegada). Pode-se apresentar também alaranjada e castanha acinzentada.
- Argila arenosa, compacta a mole, com intercalações centimétricas de areia mal selecionada, por vezes cascalhosa, com grânulos e até seixos centimétricos de quartzo esparsos na matriz, subarredondados a angulosos, com coloração cinza clara e bege.
- Areia fina a muito grossa, mal selecionada, com grãos subangulosos a subarredondados, por vezes silteosa e/ou argilosa, friável, com grânulos e seixos angulosos a subarredondados, predominantemente cinza clara, secundariamente bege, laranja e amarela.
- Argila silteosa, compacta a muito compacta, apresenta em algumas porções, intercalações centimétricas de areia mal selecionada (fina a grossa) argilosa a silteosa, predominantemente cinza clara e vermelha com pigmentos cinza, branco, ocre e bege.
- Solo argiloso preto pouco coeso e seco. Ocorrência de torrões milimétricos da mesma composição.

#### Poço de Monitoramento:



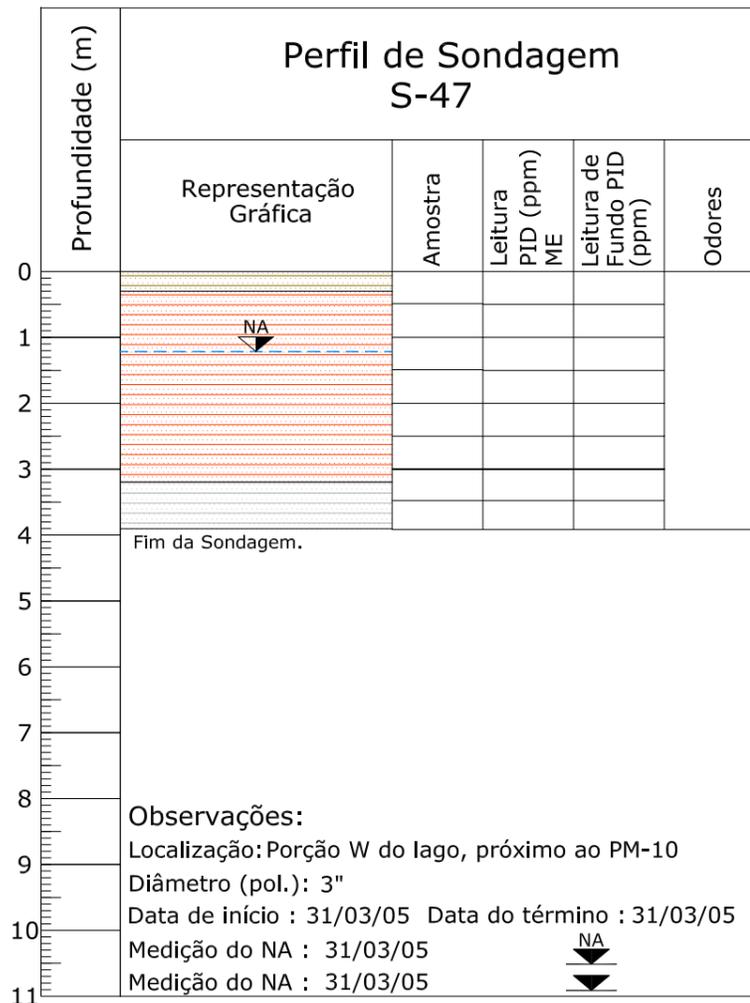
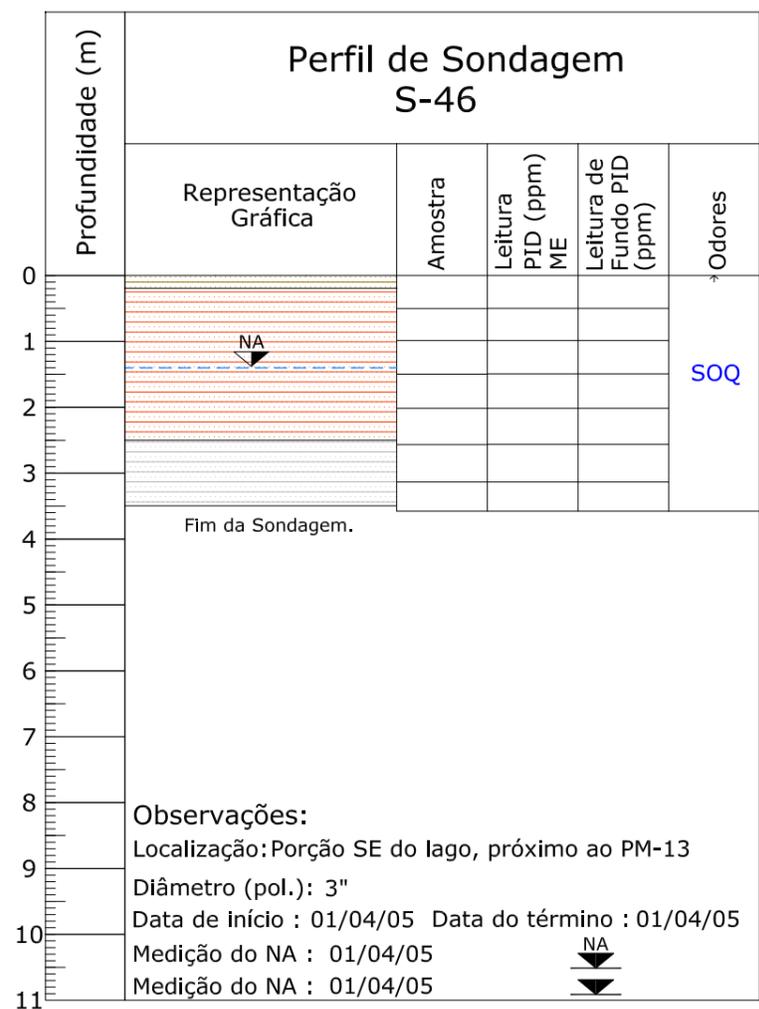
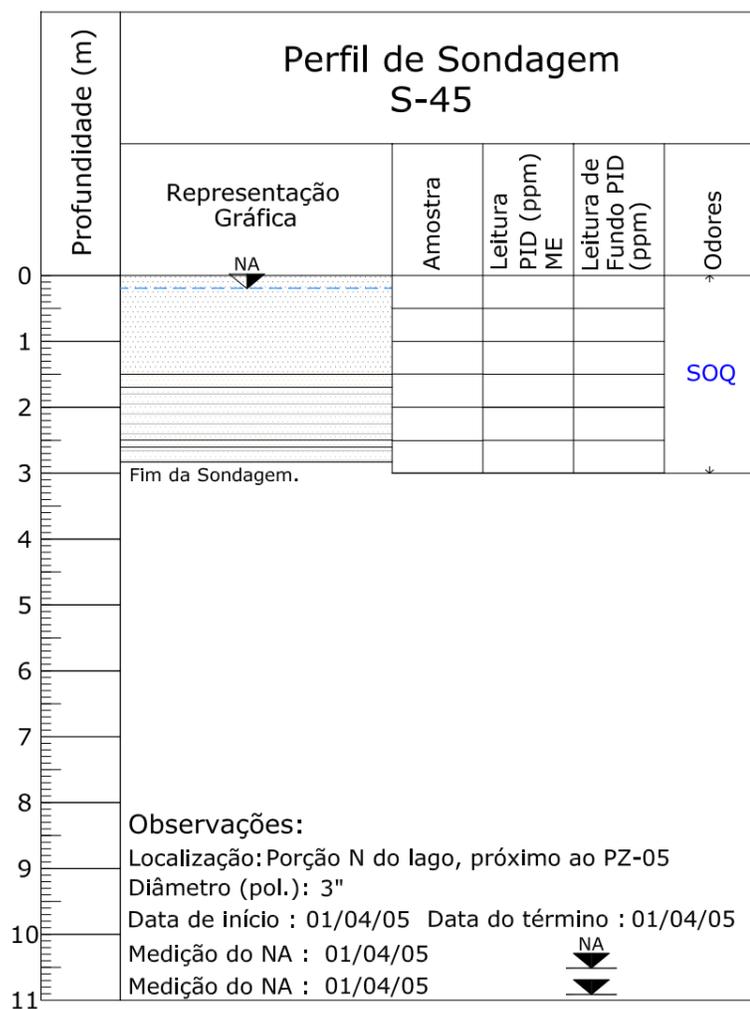
- #### Legenda de Odor:
- OQ = Odor Químico
  - SOQ = Sem Odor Químico
  - OMO = Odor de Mat. Orgânica
  - LOMO = Leve Odor de Mat. Orgân.

#### Perfis Geológicos

Local Parque das Indústrias Taubaté, Brasil

Projeto Tese de Mestrado

Data : 26/07/2005	Doc. ref.: Tese de Mestrado 01	Edição : Perfis Geológicos	Arquivo : Tavares.T	Desenho : Tavares.T
-------------------	--------------------------------	----------------------------	---------------------	---------------------



**Legenda de Odor:**

- OQ = Odor Químico
- SOQ = Sem Odor Químico
- OMO = Odor de Mat. Orgânica
- LOMO = Leve Odor de Mat. Orgân.

#### Legenda de Solo:

- Aterro de solo areno argiloso, por vezes arenoso (areia mal selecionada) com argila, friável a moderadamente compacto, com raízes e britas, predominantemente marrom, secundariamente laranja, marrom alaranjado, preto e marrom escuro.
- Aterro de solo argilo-arenoso com silte (areia fina a grossa), pouco compacto a compacto. Observa-se grânulos de quartzo esparsos, muito angulosos a subarredondados e pedriscos de quartzo e argila. Em porções pouco profundas, pode apresentar raízes e britas. Coloração predominante laranja ou laranja/ocre, laranja avermelhado e marrom alaranjado.
- Camada de areia de fundição composta por areia fina a grossa, predominante grossa, com argila, friável a mole, por vezes com matéria orgânica, de coloração preta e cinza escura, apresentando britas centimétricas a decimétricas, pedaços de vidro, metal e borracha; escória de fundição.
- Argila silto arenosa (areia fina a muito fina), pouco compacta a compacta, com grânulos de quartzo esparsos, angulosos a subarredondados, predominantemente vermelha, com pigmentos ocre, róseos, beges e brancos (variegada). Pode-se apresentar também alaranjada e castanha acinzentada.
- Argila arenosa, compacta a mole, com intercalações centimétricas de areia mal selecionada, por vezes cascalhosa, com grânulos e até seixos centimétricos de quartzo esparsos na matriz, subarredondados a angulosos, com coloração cinza clara e bege.
- Areia fina a muito grossa, mal selecionada, com grãos subangulosos a subarredondados, por vezes siltosa e/ou argilosa, friável, com grânulos e seixos angulosos a subarredondados, predominantemente cinza clara, secundariamente bege, laranja e amarela.
- Argila siltosa, compacta a muito compacta, apresenta em algumas porções, intercalações centimétricas de areia mal selecionada (fina a grossa) argilosa a siltosa, predominantemente cinza clara e vermelha com pigmentos cinza, branco, ocre e bege.

## Perfis Geológicos

Local Parque das Indústrias Taubaté, Brasil

Projeto Tese de Mestrado

Data : 26/07/2005	Doc. ref.: Tese de Mestrado	Edição : 01	Arquivo : Perfis Geológicos	Desenho : Tavares.T
-------------------	-----------------------------	-------------	-----------------------------	---------------------

**ANEXO II**  
**RELAÇÃO DE SONDAGENS E AMOSTRAS DE SOLO**  
**(2004)**

Localização	Sondagens (profundidade)	Profundidade de amostragem com liner (m)	ID das amostras de solo (intervalo amostrado-m)	Data de amostragem	Odor químico (OQ)	Observações	Parâmetros analisados
Rumo NW da ETRI	<b>S-15/PM-08</b> (8,10m)	1,0 – 1,6	S-15 (6,0m)	22/06/04	SOQ	---x---	Boro
		2,0 – 2,6			SOQ		
		3,0 – 3,6			SOQ		
		4,0 – 4,6			SOQ		
		5,0 – 5,6			SOQ		
		6,0 – 6,6			SOQ		
28m do PM-02 rumo NW	<b>S-16</b> (5,0m)	1,0 – 1,6	S-16 (2,0m)	22/06/04	OMO	---x---	Boro
		2,0 – 2,6			OMO		
		3,0 – 3,6			OMO		
		4,0 – 4,6			LOMO		
16m do PM-2 rumo NW	<b>S-17</b> (2,0m)	1,0 – 1,6	sem amostragem para análise	---x---	SOQ	---x---	---x---
		2,0 – 2,6			OMO		
15m da S-17 rumo W	<b>S-18/PM-09</b> (8,00m)	1,0 – 1,6	S-18 (4,3m)	23/06/04	SOQ	---x---	Boro
		2,0 – 2,6			OMO		
		3,0 – 3,6			SOQ		
		4,0 – 4,6	OMO		---x---		
		5,0 – 5,6	OMO				
Próxima ao lago – montante da ETRI	<b>S-19/PM-10</b> (4,20m)	1,0 – 1,6	S-19 (1,0)	23/06/04	LOMO	---x---	Boro
Próxima ao PM-10, na margem do lago	<b>S-20/PZ-01</b> (2,00m)	sem amostragem	---x---	---x---	OMO (0,3-2,0m)	---x---	---x---
12m do PP-03 rumo NNW	<b>S-21</b> (6,00m)	1,0 – 1,6	S-21 (5,0)	23/06/04	SOQ	---x---	Boro
		2,0 – 2,6			SOQ		
		3,0 – 3,6			SOQ		
		4,0 – 4,6			SOQ		
		5,0 – 5,6			SOQ		
		6,0 – 6,6			SOQ		
Porção SW do Poço de Água Residuária (Caixa 4A')	<b>S-22</b> (3,00m)	1,0 – 1,6	S-22 (3,0)	24/06/04	SOQ	Odor químico de combustível	Boro
		2,0 – 2,6			SOQ		
		3,0 – 3,6			OQ		

Localização	Sondagens (profundidade)	Profundidade de amostragem com liner (m)	ID das amostras de solo (intervalo amostrado-m)	Data de amostragem	Odor químico (OQ)	Observações	Parâmetros analisados
Montante do Poço de Água Residuária (Caixa 4A')	S-23/PM-11 (6,50m)	1,0 – 1,6	S-23 (3,0m)	24/06/04	SOQ	---x---	Boro
		2,0 – 2,6			OMO		
		3,0 – 3,6			OMO		
		4,0 – 4,6			LOQ		
Jusante do Poço de Água Residuária (Caixa 4A')	S-24/PM-12 (7,20m)	---x---	S-24 (4,0m)	24/06/04	SOQ	---x---	Boro
		2,0 – 2,6			SOQ		
		3,0 – 3,6			SOQ		
		4,0 – 4,6			SOQ		
Próxima à margem do lago, montante do Poço de Água Residuária (Caixa 4A')	S-25 (2,00m)	1,0 – 1,4	sem amostragem para análise	---x---	SOQ	---x---	---x---
2m a jusante da S-25	S-25A/PM-13 (3,50m)	1,0 – 1,4	sem amostragem para análise	---x---	OMO (2,2-3,5m)	---x---	---x---
Entre o PM-07 e a S-25A	S-26 (3,2m)	1,0 – 1,6	S-26 (3,0m)	25/06/04	SOQ	---x---	Boro
		2,0 – 2,6			SOQ		
		3,0 – 3,6			OMO		
5m da S-22 rumo SW	S-27 (4,6m)	1,0 – 1,6	sem amostragem para análise	---x---	SOQ	Odor químico de combustível/ Manchas pretas de HC	---x---
		2,0 – 2,6			SOQ		
		3,0 – 3,6			FOQ (3,5-4,5m)		
		4,0 – 4,6			FOQ		
10m da S-27 rumo W	S-28 (4,4m)	3,0 – 3,6	sem amostragem para análise	---x---	SOQ	Odor químico de combustível	---x---
		4,0 – 4,6			LOQ		
10m da S-28 rumo W (Área dos tanques de Propano)	S-29 (3,0m)	sem amostragem	---x---	---x---	OQ (2,2-3,0m)	Odor químico de combustível/ Manchas pretas de HC	---x---
10m da S-29 rumo W (Área de onde foram removidos tanques subterrâneos de Diesel)	S-30 (3,00m)	sem amostragem	---x---	---x---	OQ (2,7-3,0m)	Odor químico de combustível/ Manchas pretas de HC	---x---
10m da S-30 rumo N (Montante da antiga área com tanques subterrâneos de diesel)	S-31 (3,0m)	sem amostragem	---x---	---x---	OMO (2,6-3,0m)	Presença de matéria orgânica	---x---

Localização	Sondagens (profundidade)	Profundidade de amostragem com liner (m)	ID das amostras de solo (intervalo amostrado-m)	Data de amostragem	Odor químico (OQ)	Observações	Parâmetros analisados
15m da S-30 rumo S (Jusante da antiga área com tanques subterrâneos de diesel)	S-32 (4,0m)	sem amostragem	---x---	---x---	SOQ	---x---	---x---
18m da S-30 rumo WNW	S-33 (4,0m)	3,0-3,6	S-33 (3,0)	28/06/04	LOQ	Odor químico de combustível	Boro
		4,0-4,6			LOQ		
30m da S-33 rumo NNW	S-34 (3,5m)	1,0 – 1,6	sem amostragem para análise	28/06/04	SOQ	---x---	---x---
		2,0 – 2,6	S-34 (2,0)		SOQ		Boro
5m do Poço de Água Residuária (Caixa 4B)	S-35 (PM-14) (7,0m)	1,0 – 1,6	S-35 (3,0)	28/06/04	SOQ	Odor químico indefinido	Boro
		2,0 – 2,6			SOQ		
		3,0 – 3,6			LOQ		
		4,0 – 4,6			SOQ		
		5,0 – 5,6			SOQ		
Esquina do antigo Depósito de Óleos	S-36 (PM-15) (7,0m)	1,0 – 1,6	S-36 (4,0)	28/06/04	SOQ	---x---	Boro
		2,0 – 2,6			SOQ		
		3,0 – 3,6			SOQ		
		4,0 – 4,6			LOMO		
Montante dos leitos de separação água/óleo da ETRI	S-37 (PM-16) (7,4m)	1,0 – 1,6	S-37 (4,0)	29/06/04	SOQ	---x---	Boro
		2,0 – 2,6			SOQ		
		3,0 – 3,6			SOQ		
		4,0 – 4,6			SOQ		
		5,0 – 5,6			SOQ		
Jusante da Utilidades e Subestação (Área atual da FERRAME)	S-38 (5,8m)	1,0 – 1,6	S-38 (3,0)	29/06/04	SOQ	---x---	Boro
		2,0 – 2,6			SOQ		
		3,0 – 3,6			SOQ		
		4,0 – 4,6			SOQ		
Jusante do PP-07, próxima ao Poço de Água Residuária da Fundação de Alumínio	S-39 (1,4m)	sem amostragem	---x---	---x---	LOQ (0,8-1,4m)	Odor químico indefinido / Aterro de Areia de Fundição	---x---

Localização	Sondagens (profundidade)	Profundidade de amostragem com liner (m)	ID das amostras de solo (intervalo amostrado-m)	Data de amostragem	Odor químico (OQ)	Observações	Parâmetros analisados
16m da S-39 rumo E	<b>S-40 (PM-17)</b> (7,3m)	1,0 – 1,6	S-40 (3,0)	30/06/04	LOQ	Odor químico indefinido / Odor químico de combustível (6,9-7,1m)	Boro
		2,0 – 2,6			FOQ		
		3,0 – 3,6	S-40 (4,0)		SOQ		
		4,0 – 4,6			SOQ		
Jusante do PP-07, esquina da Moldagem	<b>S-41 (PM-18)</b> (7,0m)	1,0 – 1,6	S-41 (4,0)	30/06/04	OQ	Odor químico indefinido / Aterro de Areia de Fundição	Boro
		2,0 – 2,6			OQ		
		3,0 – 3,6			OMO		
		4,0 – 4,6			LOMO		
Próxima às caixas d'água	<b>S-42 (PM-18)</b> (4,5m)	1,0 – 1,6	S-42 (2,0)	30/04/04	SOQ	---x---	Boro
		2,0 – 2,6	sem amostragem para análise		OMO		---x---
		3,0 – 3,6			OMO		
		4,0 – 4,6			SOQ		
Jusante do PP-04	<b>S-43 (PM-19)</b> (7,0m)	1,0 – 1,6	S-43 (3,0)	01/07/04	SOQ	---x---	Boro
		2,0 – 2,6			SOQ		
		3,0 – 3,6			SOQ		
		4,0 – 4,6			SOQ		
Jusante do PM-20	<b>S-44 (PM-20)</b> (8,8m)	1,0 – 1,6	S-44 (6,0)	01/07/04	SOQ	---x---	Boro
		2,0 – 2,6			SOQ		
		3,0 – 3,6			SOQ		
		4,0 – 4,6			SOQ		
		5,0 – 5,6			SOQ		
		6,0 – 6,6			SOQ		
Área emersa do lago	<b>PZ-02</b> (3,5m)	sem amostragem	---x---	---x---	OMO (2,0-3,5m)	---x---	---x---
1,5m do PZ-02 para dentro da área emersa do lago	<b>PZ-03</b> (5,4m)	sem amostragem	---x---	---x---	OMO (2,0-5,0m)	---x---	---x---
Próxima ao PM-13, no limite da margem do lago	<b>PZ-04</b> (3,5m)	sem amostragem	---x---	---x---	OMO (0,0-3,5m)	---x---	---x---

Localização	Sondagens (profundidade)	Profundidade de amostragem com liner (m)	ID das amostras de solo (intervalo amostrado-m)	Data de amostragem	Odor químico (OQ)	Observações	Parâmetros analisados
Próxima ao PP-07, no limite da margem do lago	PZ-05 (3,0m)	sem amostragem	---x---	---x---	LOQ (0,0-1,6m)	Areia de fundição	---x---
					OMO	---x---	
Próxima ao PZ-05, na margem N do lago	S-45 (2,8m)	1,2 – 1,4*	S-45 (1,7 – 1,9)	01/04/05	LOQ	Areia de fundição	Análise Granulométrica / DRX / CTC / M.O. / pH / B
		1,4 – 1,5*			LOQ		
		1,5 – 1,7*			OQ		
		1,7 – 1,9*			OMO		
		1,9 – 2,1*	S-45 (1,7 – 1,9)	28/10/05	OMO	---x---	
		2,1 – 2,5*			OMO		
		2,5 – 2,8*			OMO		
Próxima ao PM-13, na margem SE do lago	S-46 (3,5m)	1,8 – 2,2*	S-46 (1,8 – 2,2m)	01/04/05	SOQ	---x---	Análise Granulométrica / DRX / CTC / M.O. / pH / B
		2,5 – 3,0*	S-46 (1,8 – 2,2m)	28/10/05	OMO	Presença de matéria orgânica	
		3,0 – 3,4*			OMO		
Próxima ao PM-10, na margem W do lago	S-47 (3,9m)	1,1 – 1,5*	S-47 (1,1 – 1,5m)	31/03/05	SOQ	---x---	Análise Granulométrica / DRX / CTC / M.O. / pH / B
		1,5 – 1,8*			SOQ		
		1,8 – 1,9*			SOQ		
		3,2 – 3,4*	S-47 (3,4 – 3,5m)	28/10/05	OMO		
		3,4 – 3,5*			OMO		
		3,5 – 3,7*			OMO		
		3,7 – 3,9*			OMO		
Jusante do PM-12, ao lado do Tratamento Térmico	S-48 (7,6m)	sem amostragem	---x---	---x---	SOQ	---x---	---x---

OMO – Odor de matéria orgânica; LOMO – Leve odor de matéria orgânica; FOMO – Forte odor de matéria orgânica;

OQ – Odor químico; SOQ – Sem odor químico; LOQ – Leve odor químico; FOQ – Forte odor químico;

DRX – Difração de raio X; CTC – capacidade de troca catiônica; M.O. – matéria orgânica; B – boro;

\* amostragem diretamente do trado para saco de plástico hermético do tipo zip.

**ANEXO III**  
**MEDIÇÕES DE NÍVEL DE ÁGUA**

Pontos de medição de N.A.	Cota do tubo (m)	N.A. (26/07/03)	N.A. (01/09/03)	N.A. (27/07/04)	N.A. (14-15/10/04)	N.A. (DEZ/04)	N.A. (28/01/05)	N.A. (31/03/05)	N.A. (28/10/05)
PM-01	569,524	6,65	---x---	5,72	6,39	---x---	---x---	4,335	6,48
PM-01P	569,566	---x---	---x---	---x---	6,43	---x---	4,75	4,38	6,53
PM-02	569,154	6,56	---x---	5,69	6,32	---x---	4,74	---x---	6,415
PM-03	569,404	4,72	---x---	3,895	4,58	---x---	2,90	3,29	4,28
PM-04	569,296	6,03	---x---	4,76	5,50	---x---	4,57	3,64	5,29
PM-05	569,056	5,94	---x---	5,01	5,69	---x---	3,88	3,56	5,665
PM-06	569,254	6,37	---x---	5,46	6,13	---x---	4,52	4,06	6,22
PM-07	569,952	5,10	---x---	4,245	5,02	---x---	3,31	3,515	4,485
PM-08	569,367	---x---	---x---	5,99	6,60	---x---	5,10	4,565	6,74
PM-09	569,224	---x---	---x---	5,43	6,51	---x---	4,96	4,48	6,61
PM-10	567,397	---x---	---x---	1,91	3,03	---x---	0,62	0,79	2,68
PM-10P	567,538	---x---	---x---	---x---	3,59	---x---	2,70	1,625	3,405
PM-11	569,890	---x---	---x---	4,22	4,95	---x---	3,20	3,32	4,45
PM-12	569,903	---x---	---x---	4,51	5,36	---x---	3,61	3,605	4,86
PM-13	567,049	---x---	---x---	1,17	1,88	---x---	0,32	0,495	1,33
PM-14	569,603	---x---	---x---	4,69	5,53	---x---	3,38	3,475	5,30
PM-15	569,481	---x---	---x---	5,20	5,88	---x---	3,97	3,80	5,80
PM-16	569,209	---x---	---x---	5,215	5,91	---x---	4,09	3,88	6,01
PM-17	569,765	---x---	---x---	4,25	4,95	---x---	3,23	3,71	4,69
PM-18	569,681	---x---	---x---	4,25	5,01	---x---	3,25	3,89	4,90
PM-19	569,697	---x---	---x---	4,20	4,98	---x---	3,17	3,485	4,47
PM-20	569,608	---x---	---x---	6,04	6,67	---x---	5,17	4,635	6,75
PP-01	568,950	6,50	---x---	5,46	6,10	---x---	4,51	4,05	---x---
PP-02	569,319	6,45	---x---	---x---	6,19	---x---	4,31	4,14	6,28
PP-03	569,563	6,14	---x---	5,46	5,95	---x---	---x---	4,015	6,81
PP-04	568,949	4,05	---x---	---x---	---x---	---x---	---x---	---x---	---x---
PP-06	567,707	2,82	---x---	2,07	2,69	---x---	---x---	1,37	2,20
PP-07	569,486	4,67	---x---	3,95	4,61	---x---	2,92	---x---	---x---
PZ-01	566,720	---x---	---x---	1,065	---x---	---x---	---x---	---x---	---x---
PZ-02	566,966	---x---	---x---	0,98	1,67	---x---	0,27	0,38	1,07
PZ-03	566,858	---x---	---x---	0,89	1,57	---x---	0,17	0,26	0,98
PZ-04	566,759	---x---	---x---	---x---	1,50	---x---	---x---	-0,03	0,99
PZ-05	566,743	---x---	---x---	---x---	1,80	---x---	-0,07	---x---	1,49
LAGO	C.H.	566,054	---x---	566,374	566,100	---x---	566,260	566,813	566,341
PM-21	568,977	---x---	---x---	5,91	6,46	---x---	5,03	4,49	6,565
PM-22	569,003	---x---	---x---	5,97	6,50	---x---	4,87	4,49	6,61
PM-23	568,772	---x---	---x---	7,21	7,43	---x---	5,63	5,67	7,88
PM-24	568,830	---x---	---x---	5,86	6,73	---x---	5,25	4,945	6,78
PM-25	568,675	---x---	---x---	6,05	6,62	---x---	5,30	4,77	6,72

Pontos de medição de N.A.	Cota do tubo (m)	N.A. (26/07/03)	N.A. (01/09/03)	N.A. (27/07/04)	N.A. (14-15/10/04)	N.A. (DEZ/04)	N.A. (28/01/05)	N.A. (31/03/05)	N.A. (28/10/05)
PM-26	568,615	---x---	---x---	6,15	6,76	---x---	5,04	4,96	6,825
PM-27	568,499	---x---	---x---	6,10	6,50	---x---	4,70	4,775	6,53
PM-28	569,260	---x---	---x---	6,23	6,87	---x---	5,64	5,16	6,915
PM-29	567,880	---x---	---x---	4,70	5,35	---x---	3,49	4,12	5,275
PM-30	569,160	---x---	---x---	4,62	5,48	---x---	3,91	4,22	5,47
PM-31	567,680	---x---	---x---	---x---	4,71	---x---	3,28	3,78	4,12
PM-32	567,360	---x---	---x---	---x---	4,47	---x---	3,10	3,60	4,48
PM-33	566,266	---x---	---x---	---x---	3,60	---x---	2,42	2,945	---x---
PM-34	568,926	---x---	---x---	---x---	6,12	---x---	4,78	5,10	6,105
PM-35	568,637	---x---	---x---	---x---	5,73	---x---	4,48	4,83	5,77
PM-36	569,723	---x---	---x---	---x---	6,38	---x---	4,74	5,12	6,345
PM-37	568,866	---x---	---x---	---x---	5,69	---x---	4,07	4,50	5,675
PM-38	567.349	---x---	---x---	---x---	---x---	---x---	2,58	3,48	4,42
PM-39	566.845	---x---	---x---	---x---	---x---	---x---	2,87	3,16	4,07
PM-40	565.072	---x---	---x---	---x---	---x---	---x---	1,47	1,80	---x---
PM-41	567.992	---x---	---x---	---x---	---x---	---x---	3,53	4,25	4,21
PM-42	567.992	---x---	---x---	---x---	---x---	---x---	3,27	3,83	4,795
PM-43	567.828	---x---	---x---	---x---	---x---	---x---	3,31	3,91	4,89
PM-44	567.739	---x---	---x---	---x---	---x---	---x---	3,27	3,84	4,815
PM-45	567.648	---x---	---x---	---x---	---x---	---x---	3,38	3,905	4,75
PM-46	567.629	---x---	---x---	---x---	---x---	---x---	3,17	3,73	4,68
PM-47	568.085	---x---	---x---	---x---	---x---	---x---	3,70	4,31	5,15
PM-48	570,236	---x---	---x---	---x---	7,42	---x---	5,87	5,49	7,595
PM-49	569,937	---x---	---x---	---x---	7,52	---x---	5,77	5,535	7,58
PM-50	570,152	---x---	---x---	---x---	7,72	---x---	5,87	5,685	7,765
PM-51	569,549	---x---	---x---	---x---	7,47	---x---	5,66	5,56	---x---
PM-52	570,028	---x---	---x---	---x---	7,73	---x---	6,06	5,76	7,79
PM-53	569,478	---x---	---x---	---x---	7,40	---x---	5,47	5,47	7,42
PM-54	565,899	---x---	2,92	---x---	2,15	---x---	0,78	0,82	2,16
PM-55	565,899	---x---	3,51	---x---	2,78	---x---	1,47	1,98	2,885
PM-56	566,849	---x---	4,61	---x---	3,95	---x---	2,70	3,24	4,005
PM-57	570,529	---x---	7,03	---x---	6,39	---x---	3,88	3,98	6,11
PM-58	569,549	---x---	6,75	5,60	6,28	---x---	4,64	4,175	6,30
PM-59	569,684	---x---	8,60	---x---	---x---	---x---	6,23	6,43	8,775
Cór. Pinhão I	C.H.	---x---	---x---	---x---	553,245	---x---	553,380	553,315	553,730
Cór. Pinhão II*	C.H.	---x---	---x---	---x---	551,577	---x---	551,712	551,647	551,850
Cór. Pinhão III*	C.H.	---x---	---x---	---x---	543,275	---x---	543,410	543,345	543,748
Cór. Judeu I	C.H.	---x---	---x---	---x---	552,247	---x---	552,149	552,089	552,094
Cór Judeu II*	C.H.	---x---	---x---	---x---	546,239	---x---	546,141	546,081	546,200
Cór Judeu III*	C.H.	---x---	---x---	---x---	558,309	---x---	558,211	558,151	558,320

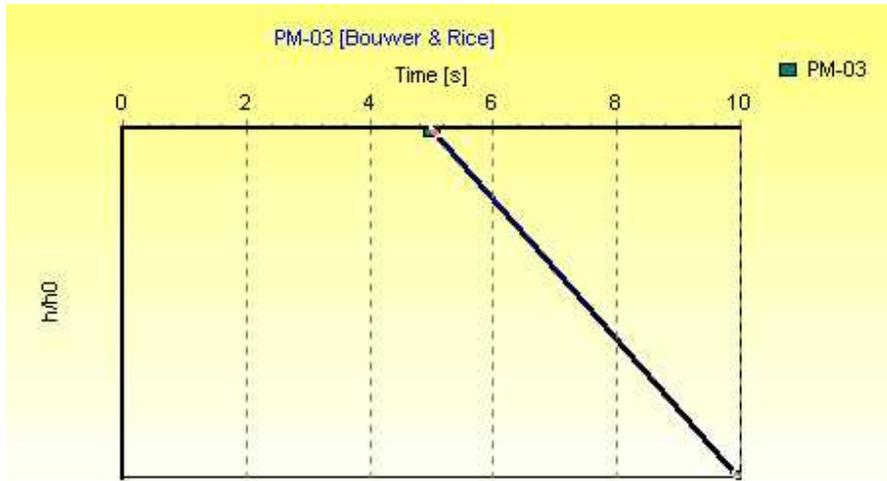
N.A. = nível de água; C.H. – Carga Hidráulica; ---x--- medida não disponível

Níveis de água medidos em relação à boca do tubo do poço nos poços de monitoramento (PMs) e nos piezômetros (PZs); e aos marcos topográficos instalados no lago e nos córregos.

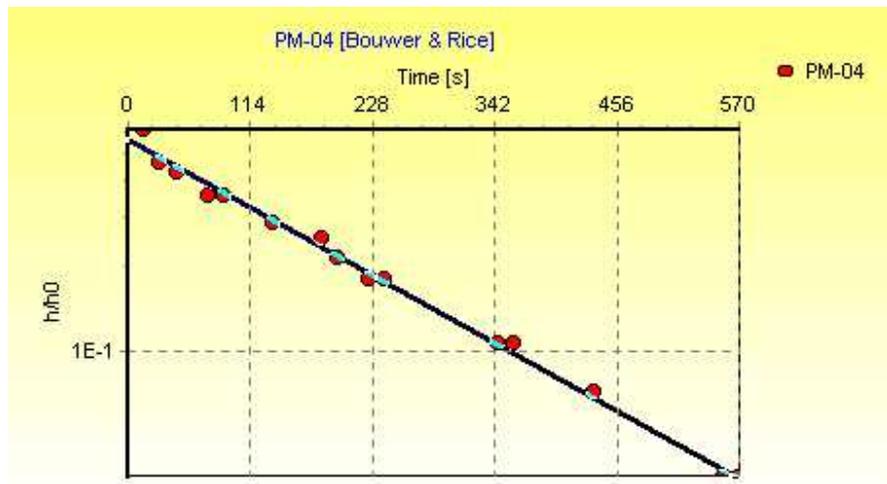
PM – poço de monitoramento, PP – poço provisório, PZ – piezômetro, LAGO – cota do nível do lago, Cór. Pinhão – cota do nível nos córregos.

\*Cargas Hidráulicas extrapoladas pelo gradiente topográfico dos córregos e pela espessura da lâmina de água nos pontos de medição (Córrego Pinhão I e Córrego do Judeu I).

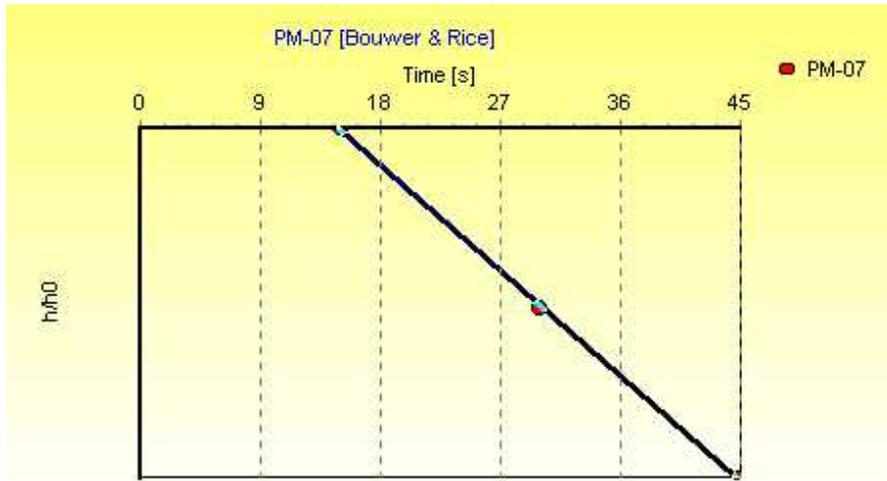
**ANEXO IV**  
**GRÁFICOS DE SLUG TESTs**



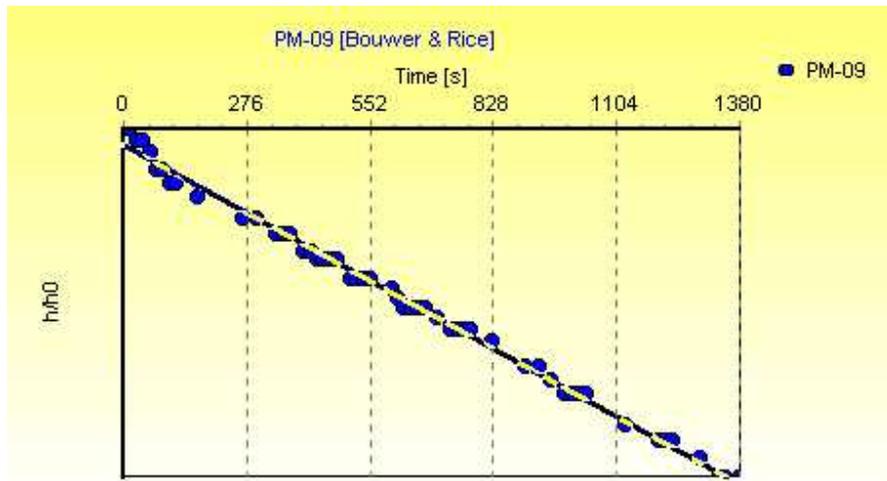
Conductivity: 5.84E-5 m/s



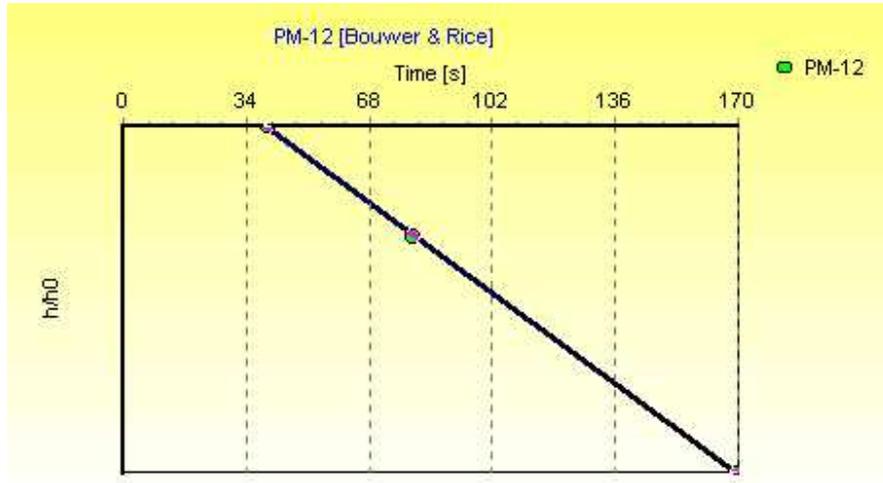
Conductivity: 1.90E-6 m/s



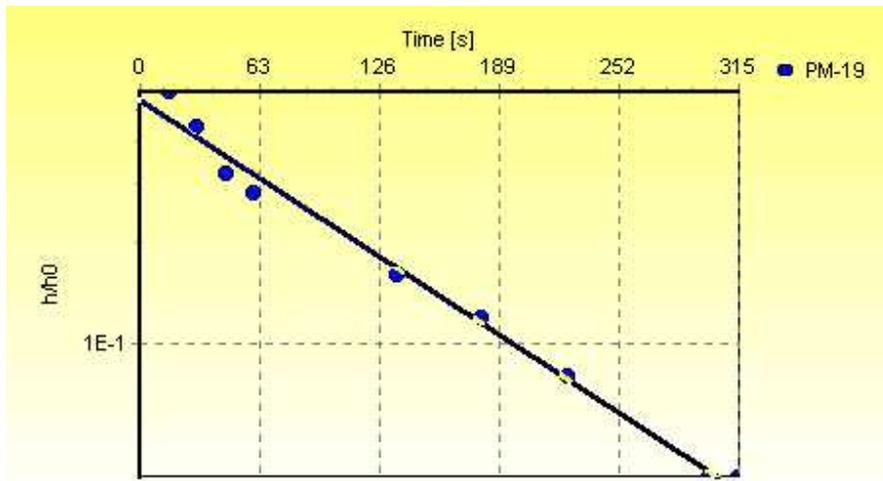
Conductivity:  $8.12E-6$  m/s



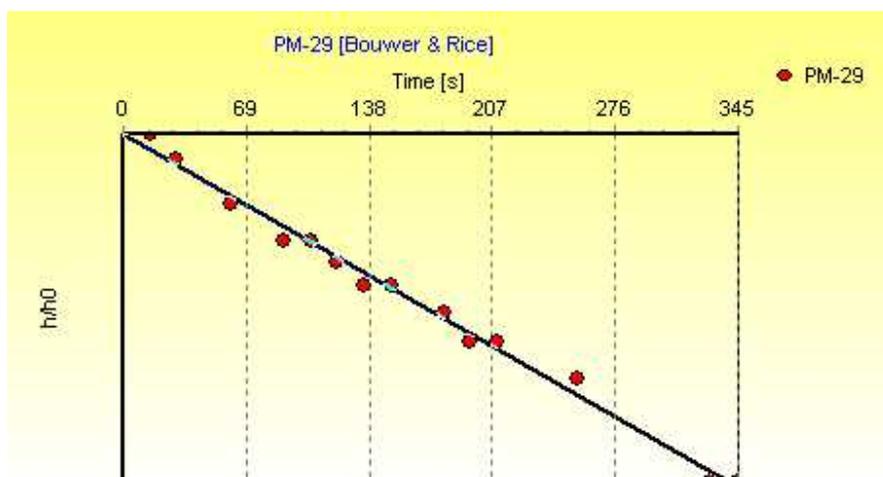
Conductivity:  $1.76E-7$  m/s



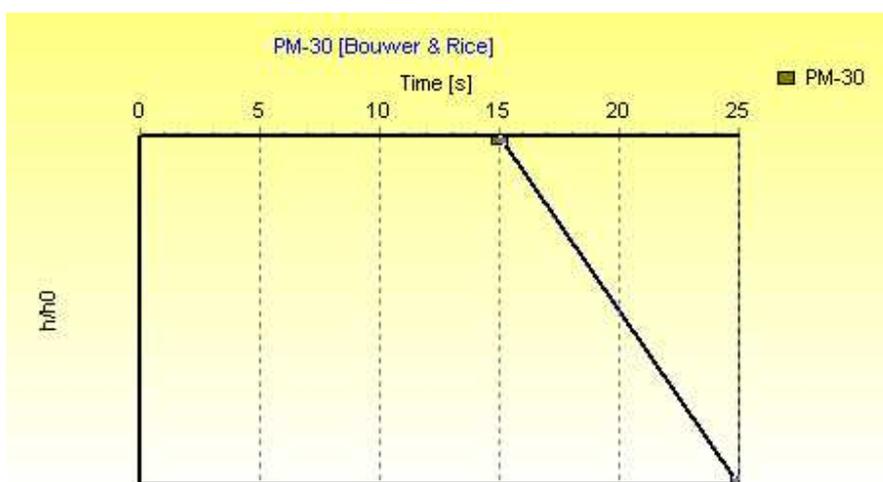
Conductivity: 2.82E-6 m/s



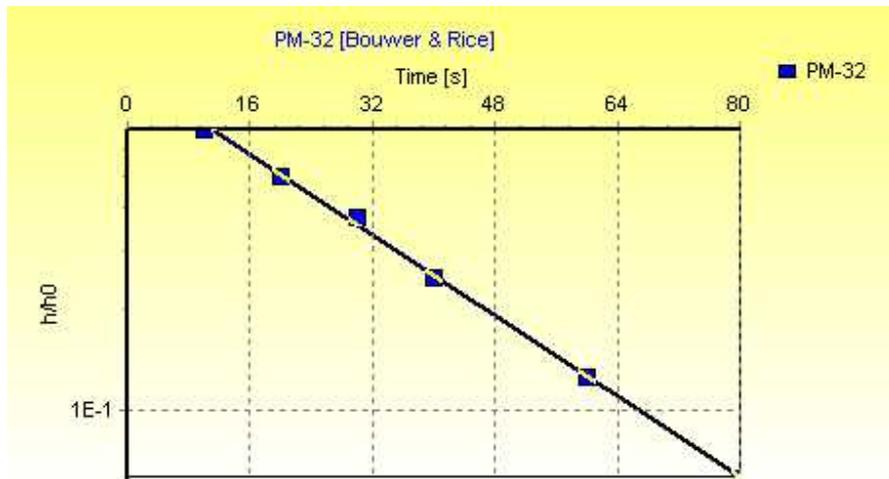
Conductivity: 1.74E-6 m/s



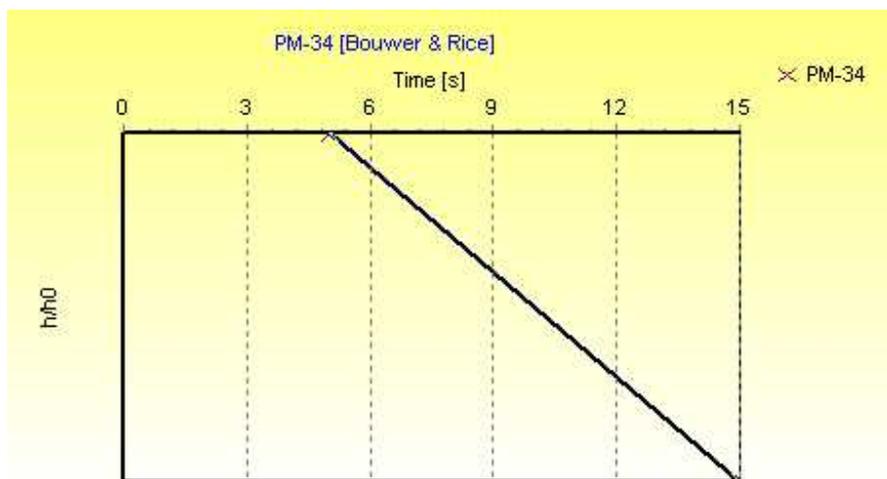
Conductivity: 1.07E-6 m/s



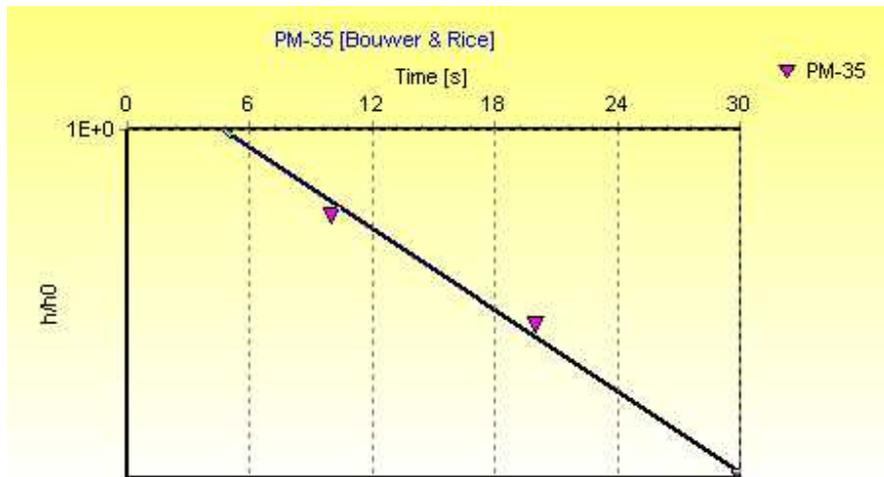
Conductivity: 1.52E-5 m/s



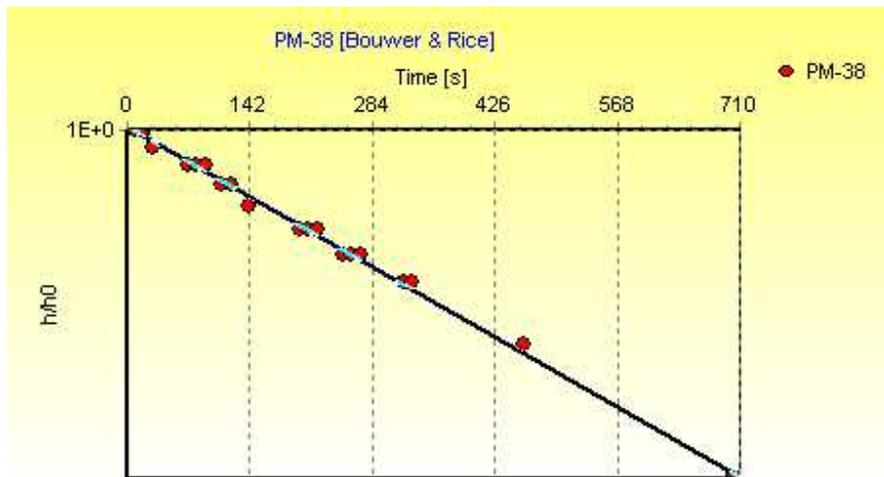
Conductivity:  $7.33E-6$  m/s



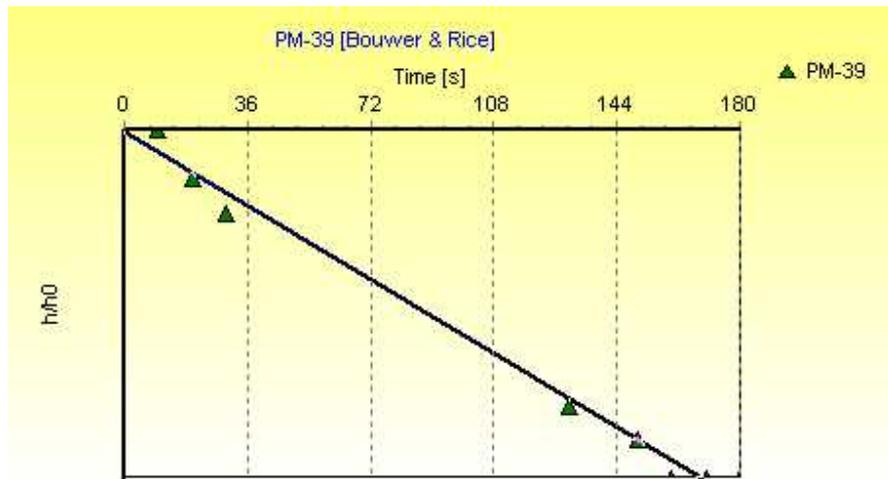
Conductivity:  $3.55E-5$  m/s



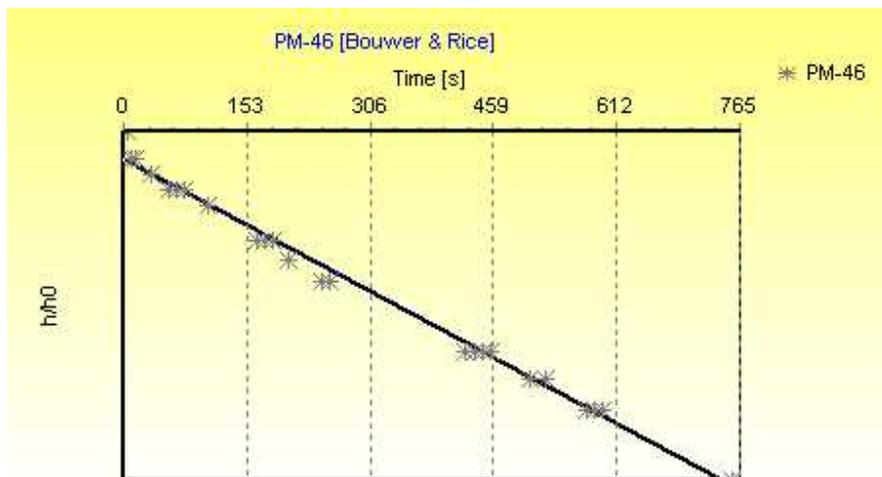
Conductivity: 7.98E-6 m/s



Conductivity: 3.72E-7 m/s



Conductivity: 2.00E-6 m/s



Conductivity: 3.52E-7 m/s

**ANEXO V**  
**CÁLCULOS DA VELOCIDADE DE FLUXO**  
**SUBTERRÂNEO**

**JUL/2004**

Porção do lago	Pontos	K (m/s)	i (%)	V (m/s)	V (m/ano)
Norte (N)	Lago / PP-07	3,71E-6	5,46	3,12E-6	98,28
	Lago / PM-18	3,71E-6	1,19	6,79E-7	21,42
Leste (E)	Lago / PP-06	1,74E-6	3,68	9,62E-7	30,35
	Lago / PM-19	1,74E-6	1,70	4,55E-7	14,35
Sudeste (SE)	Lago / PM-13	8,12E-6	5,50	6,87E-6	216,68
	Lago / PM-12	2,80E-6	2,50	1,08E-6	33,96
Sul (S)	Lago / PM-14	3,71E-6	2,98	1,70E-6	53,64
Oeste (W)	Lago / PM-10	2,80E-6	10,46	4,51E-6	142,10
	Lago / PM-05	1,90E-6	4,70	1,37E-6	43,33
	PM-16 / PP-01	2,80E-6	0,70	3,02E-7	9,51
	PP-01 / PM-08	2,80E-6	0,24	1,03E-7	3,26

**OUTUBRO/2004** \* iso = linha isotopotencial = equipotencial (manm).

Porção do lago	Pontos	K (m/s)	i (%)	V (m/s)	V (m/ano)
Norte (N)	Lago / PP-07	3,71E-06	8,74	4,99E-06	157,32
	Lago / PM-18	3,71E-06	6,02	3,44E-06	108,36
	iso*566/565	3,71E-06	3,22	1,84E-06	57,96
	iso 565/564	3,71E-06	0,93	5,31E-07	16,74
	iso 564/563	3,71E-06	1,17	6,68E-07	21,06
	iso 563/562	1,08E-06	1,20	1,99E-07	6,29
	iso 562/561	1,08E-06	1,22	2,03E-07	6,39
Nordeste (NE)	iso 566/565	3,71E-06	2,02	1,15E-06	36,36
	iso 565/564	3,71E-06	1,45	8,28E-07	26,10
	iso 564/563	1,08E-06	0,71	1,18E-07	3,72
	Lago / PM-35	2,11E-06	1,16	3,77E-07	11,88
	iso 563/562	2,82E-06	0,99	4,30E-07	13,54
	iso 562/561	2,82E-06	1,43	6,20E-07	19,56
Leste (E)	Lago / PP-06	1,74E-06	6,02	1,61E-06	50,82
	Lago / PM-19	1,74E-06	2,92	7,82E-07	24,65
Sudeste (SE)	Lago / PM-13	8,12E-06	12,17	1,52E-05	479,45
	Lago / PM-12	2,82E-06	4,29	1,86E-06	58,69
	iso 566/565	8,12E-06	2,64	3,30E-06	104,00
	iso 565/564	2,82E-06	0,26	1,13E-07	3,56
	Lago / PM-54	6,08E-06	0,50	4,68E-07	14,75
	iso 564/563	7,30E-06	0,90	1,01E-06	31,88
	iso 563/562	2,82E-06	1,34	5,81E-07	18,33
iso 562/561	2,82E-06	1,59	6,90E-07	21,75	
Sul (S)	Lago / PM-14	3,71E-06	4,35	2,48E-06	78,30
	Lago / PM-57	8,31E-06	0,52	6,65E-07	20,97
Oeste (W)	Lago / PM-10	2,80E-06	22,30	9,61E-06	302,94
	Lago / PM-05	1,90E-06	5,69	1,66E-06	52,45
	PM-04 / PM-01	2,80E-06	1,08	4,65E-07	14,67
	PM-01 / PM-09	1,70E-07	0,46	1,20E-08	0,38
	iso 566/565	2,80E-06	6,54	2,82E-06	88,84
	iso 565/564	1,90E-06	4,33	1,27E-06	39,91
	iso 564/563	2,80E-06	1,26	5,43E-07	17,12
	iso 563/562	1,90E-06	0,83	2,43E-07	7,65
iso 562/561	1,90E-06	1,40	4,09E-07	12,91	

**MARÇO/2005**

Porção do lago	Pontos	K (m/s)	i (%)	V (m/s)	V (m/ano)
Norte (N)	Lago / iso* 566	3,71E-06	1,77	1,01E-06	31,86
	Lago / PM-18	3,71E-06	1,36	7,76E-07	24,48
	iso 566/565	3,71E-06	1,00	5,71E-07	18,00
	iso 565/564	3,71E-06	1,32	7,53E-07	23,76
	iso 564/563	3,71E-06	1,25	7,13E-07	22,50
	iso 563/562	1,08E-06	1,32	2,19E-07	6,92
Nordeste (NE)	iso 562/561	1,08E-06	1,42	2,36E-07	7,44
	Lago / iso 566	3,71E-06	1,3	7,42E-07	23,40
	iso 566/565	3,71E-06	1,3	7,42E-07	23,40
	iso 565/564	3,71E-06	0,86	4,91E-07	15,48
	iso 564/563	1,08E-06	0,98	1,63E-07	5,14
	Lago / PM-35	2,11E-06	1,10	3,57E-07	11,26
Leste (E)	iso 563/562	2,82E-06	1,75	7,59E-07	23,94
	iso 562/561	2,82E-06	1,90	8,24E-07	26,00
	Lago / PP-06	1,74E-06	2,51	6,72E-07	21,19
Sudeste (SE)	Lago / PM-19	1,74E-06	1,22	3,27E-07	10,30
	Lago / PM-13	8,12E-06	3,07	3,84E-06	120,94
	Lago / PM-12	2,82E-06	1,35	5,86E-07	18,47
	Lago / iso 566	8,12E-06	0,25	3,12E-07	9,85
	iso 566/565	8,12E-06	0,45	5,62E-07	17,73
	Lago / PM-54	6,08E-06	0,37	3,46E-07	10,91
	iso 565/564	2,82E-06	1,89	8,20E-07	25,86
	iso 564/563	7,30E-06	2,06	2,31E-06	72,96
	iso 563/562	2,82E-06	2,16	9,37E-07	29,55
Sul (S)	iso 562/561	2,82E-06	2,23	9,67E-07	30,51
	Lago / PM-14	3,71E-06	1,42	8,10E-07	25,56
Oeste (W)	Lago / PM-57	8,31E-06	0,064	8,18E-08	2,58
	Lago / PM-10	2,80E-06	2,34	1,01E-06	31,79
	Lago / PM-05	1,90E-06	2,69	7,86E-07	24,80
	PM-04 / PP-01	2,80E-06	0,88	3,79E-07	11,95
	PP-01 / PM-09	1,70E-07	0,23	6,02E-09	0,19
	Lago / iso 566	2,80E-06	2,82	1,21E-06	38,31
	iso 566/565	2,80E-06	1,14	4,91E-07	15,49
	iso 565/564	1,90E-06	0,70	2,05E-07	6,45
	iso 564/563	2,80E-06	1,30	5,60E-07	17,66
	iso 563/562	1,90E-06	1,60	4,68E-07	14,75
iso 562/561	1,90E-06	1,82	5,32E-07	16,78	

\* iso = linha isotencial = equipotencial (manm).

**OUTUBRO/2005**

Porção do lago	Pontos	K (m/s)	i (%)	V (m/s)	V (m/ano)
Norte (N)	Lago / iso* 566	3,71E-06	3,28	1,87E-06	59,04
	Lago / PM-18	3,71E-06	2,13	1,22E-06	38,34
	iso 566/565	3,71E-06	2,06	1,18E-06	37,08
	iso 565/564	3,71E-06	1,27	7,25E-07	22,86
	iso 564/563	3,71E-06	1,15	6,56E-07	20,70
	iso 563/562	1,08E-06	1,35	2,24E-07	7,07
Nordeste (NE)	iso 562/561	1,08E-06	1,44	2,39E-07	7,55
	Lago / iso 566	3,71E-06	2,10	1,20E-06	37,80
	iso 566/565	3,71E-06	1,82	1,04E-06	32,76
	iso 565/564	3,71E-06	1,71	9,76E-07	30,78
	iso 564/563	1,08E-06	0,88	1,46E-07	4,61
	iso 563/562	2,82E-06	1,20	5,21E-07	16,42
Leste (E)	Lago / PM-35	2,11E-06	1,27	4,12E-07	13,00
	iso 562/561	2,82E-06	1,56	6,77E-07	21,34
	Lago / PP-06	1,74E-06	4,63	1,24E-06	39,09
* Sudeste (SE)	Lago / PM-19	1,74E-06	2,36	6,32E-07	19,92
	Lago / PM-13	8,12E-06	8,13	1,02E-05	320,29
	Lago / PM-12	2,82E-06	3,57	1,55E-06	48,84
	Lago / iso 566	8,12E-06	3,27	4,08E-06	128,82
	iso 566/565	8,12E-06	1,44	1,80E-06	56,73
	Lago / PM-54	6,08E-06	0,55	5,14E-07	16,22
	iso 565/564	2,82E-06	0,29	1,26E-07	3,97
	iso 564/563	7,30E-06	1,04	1,17E-06	36,83
Sul (S)	iso 563/562	2,82E-06	1,69	7,33E-07	23,12
	iso 562/561	2,82E-06	1,75	7,59E-07	23,94
	Lago / PM-14	3,71E-06	2,04	1,16E-06	36,72
Oeste (W)	Lago / PM-57	8,31E-06	0,51	6,52E-07	20,56
	Lago / PM-10	2,80E-06	20,9	9,00E-06	283,92
	Lago / PM-05	1,90E-06	6,15	1,80E-06	56,69
	PM-04 / PM-01	2,80E-06	1,58	6,81E-07	21,46
	PM-01 / PM-09	1,70E-07	1,54	4,03E-08	1,27
	Lago / iso 566	2,80E-06	18,46	7,95E-06	250,77
	iso 566/565	2,80E-06	7,77	3,35E-06	105,55
	iso 565/564	1,90E-06	4,40	1,29E-06	40,56
	iso 564/563	2,80E-06	1,47	6,33E-07	19,97
	iso 563/562	1,90E-06	0,77	2,25E-07	7,10
iso 562/561	1,90E-06	1,14	3,33E-07	10,51	

\* iso = linha isopotencial = equipotencial (manm).

**ANEXO VI**  
**RESULTADOS DAS ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS**

**IGcUSP - GSA - LABSED**

**Data: 30/03/05**

<b>Amostra: S-45 (1,7-1,9) 01/04/05</b>		<b>Massa dispersante (g):</b> 1.00	
<b>*Antes da separação granulométrica*</b>		<b>*Após a separação granulométrica*</b>	
Massa total inicial - Mi (g)	61.29	Partículas 4,000 - 0,062 (g)	32.6168
Massa dos seixos (g)	0	Partículas menores 0,062 (g)	25.7100
Eliminação ataque químico (g)	0	Massa total final - Mf (g)	58.3268
Volume da proveta - Vp (ml)	1000	Fator de correção Mi/Mf	1.0508

**PIPETAGEM**

Granulometria (mm)	Tempo (min:s)		M. total (g)	M. frasco (g)	M.alíquota (g)	M.suspens alíq (g)	M susp.total (g)
	10cm	20cm	Mt	Mfr	Mt-Mfr-D	Ms	Ms*Vp/20
0,062 - 0,031	0:29	0:58	10.1300	9.5958	0.5142	0.0792	3.9600
0,031 - 0,016	1:56	3:52	9.2309	8.7759	0.4350	0.0657	3.2850
0,016 - 0,008	7:44	15:28	9.7065	9.3172	0.3693	0.0774	3.8700
0,008 - 0,004	31:00	62:00	9.4335	9.1216	0.2919	0.0574	2.8700
<0,004	123:00	246:00	10.0032	9.7487	0.2345	0.2345	11.7250

**PENEIRAMENTO**

**CÁLCULOS PARA CURVA ACUMULATIVA E HISTOGRAMA**

Granulometria (mm)	Massa (g)	M.corrig (g)	Prp.massa (%)	Prp.acumulada (%)	Wentworth	Krumbein (phi)
4,000 - 2,830	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	grânulo	
2,830 - 2,000	0.0654	0.0687	0.1121	0.1121	grânulo	0.11
2,000 - 1,410	0.3524	0.3703	0.6042	0.7163	areia mt.grossa	
1,410 - 1,000	0.7636	0.8024	1.3092	2.0255	areia mt.grossa	1.91
1,000 - 0,707	1.5945	1.6755	2.7337	4.7592	areia grossa	
0,707 - 0,500	3.1376	3.2970	5.3793	10.1386	areia grossa	8.11
0,500 - 0,354	5.1218	5.3820	8.7812	18.9198	areia média	
0,354 - 0,250	5.0283	5.2838	8.6209	27.5407	areia média	17.40
0,250 - 0,177	4.7820	5.0249	8.1986	35.7393	areia fina	
0,177 - 0,125	5.5240	5.8046	9.4708	45.2101	areia fina	17.67
0,125 - 0,088	3.9142	4.1131	6.7108	51.9209	areia mt.fina	
0,088 - 0,062	2.3330	2.4515	3.9999	55.9208	areia mt.fina	10.71
<0,062* (fundo)	5.7072	5.9971			silte/argila	
0,062 - 0,031	3.9600	4.1612	6.7893	62.7101	silte grosso	
0,031 - 0,016	3.2850	3.4519	5.6321	68.3422	silte médio	
0,016 - 0,008	3.8700	4.0666	6.6350	74.9772	silte fino	
0,008 - 0,004	2.8700	3.0158	4.9206	79.8977	silte mt. fino	24.0
<0,004	11.7250	12.3207	20.1023	100.0000	argila	20.1
<b>Total</b>	<b>58.3268</b>	<b>61.2900</b>	<b>100.0000</b>			

**IGcUSP - GSA - LABSED**

<b>Amostra: S-46 (1,8-2,2) 01/04/05</b>		<b>Massa dispersante (g):</b>	
<b>*Antes da separação granulométrica*</b>		<b>*Após a separação granulométrica*</b>	
Massa total inicial - Mi (g)	62.03	Partículas 4,000 - 0,062 (g)	25.2187
Massa dos seixos (g)	0	Partículas menores 0,062 (g)	32.6100
Eliminação ataque químico (g)	0	Massa total final - Mf (g)	57.8287
Volume da proveta - Vp (ml)	1000	Fator de correção Mi/Mf	1.0727

**PIPETAGEM**

Granulometria (mm)	Tempo (min:s)		M. total (g)	M. frasco (g)	M.alíquota (g)	M.suspens alíq (g)	M susp.total (g)
	10cm	20cm	Mt	Mfr	Mt-Mfr-D	Ms	Ms*Vp/20
0,062 - 0,031	0:29	0:58	13.6054	12.9532	0.6522	0.0080	0.4000
0,031 - 0,016	1:56	3:52	13.6584	13.0142	0.6442	0.0554	2.7700
0,016 - 0,008	7:44	15:28	13.0790	12.4902	0.5888	0.0080	0.4000
0,008 - 0,004	31:00	62:00	13.7380	13.1572	0.5808	0.0032	0.1600
<0,004	123:00	246:00	13.5165	12.9389	0.5776	0.5776	28.8800

**PENEIRAMENTO**

**CÁLCULOS PARA CURVA ACUMULATIVA E HISTOGRAMA**

Granulometria (mm)	Massa (g)	M.corrig (g)	Prp.massa (%)	Prp.acumulada (%)	Wentworth	Krumbein (phi)
4,000 - 2,830	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	grânulo	
2,830 - 2,000	0.0326	0.0350	0.0564	0.0564	grânulo	0.06
2,000 - 1,410	0.0470	0.0504	0.0813	0.1376	areia mt.grossa	
1,410 - 1,000	1.0229	1.0972	1.7688	1.9065	areia mt.grossa	1.85
1,000 - 0,707	1.4654	1.5719	2.5340	4.4405	areia grossa	
0,707 - 0,500	2.0683	2.2186	3.5766	8.0171	areia grossa	6.11
0,500 - 0,354	3.4468	3.6972	5.9604	13.9775	areia média	
0,354 - 0,250	3.7128	3.9825	6.4203	20.3978	areia média	12.38
0,250 - 0,177	3.5210	3.7768	6.0887	26.4865	areia fina	
0,177 - 0,125	4.3951	4.7144	7.6002	34.0867	areia fina	13.69
0,125 - 0,088	3.1220	3.3488	5.3987	39.4854	areia mt.fina	
0,088 - 0,062	2.3848	2.5581	4.1239	43.6093	areia mt.fina	9.52
<0,062* (fundo)	2.3941	2.5680			silte/argila	
0,062 - 0,031	0.4000	0.4291	0.6917	44.3010	silte grosso	
0,031 - 0,016	2.7700	2.9712	4.7900	49.0910	silte médio	
0,016 - 0,008	0.4000	0.4291	0.6917	49.7827	silte fino	
0,008 - 0,004	0.1600	0.1716	0.2767	50.0594	silte mt. fino	6.5
<0,004	28.8800	30.9782	49.9406	100.0000	argila	49.9
<b>Total</b>	<b>57.8287</b>	<b>62.0300</b>	<b>100.0000</b>			

**IGcUSP - GSA - LABSED**

Data: 30/03/06

Amostra: S-47 (1,1-1,5) 31/03/05

Massa dispersante (g):

*Antes da separação granulométrica*		*Após a separação granulométrica*	
Massa total inicial - Mi (g)	60.92	Partículas 4,000 - 0,062 (g)	24.0866
Massa dos seixos (g)	0	Partículas menores 0,062 (g)	27.9250
Eliminação ataque químico (g)	0	Massa total final - Mf (g)	52.0116
Volume da proveta - Vp (ml)	1000	Fator de correção Mi/Mf	1.1713

**PIPETAGEM**

Granulometria (mm)	Tempo (min:s)		M. total (g)	M. frasco (g)	M. alíquota (g)	M. suspens alíq (g)	M susp. total (g)
	10cm	20cm	Mt	Mfr	Mt-Mfr-D	Ms	Ms*Vp/20
0,062 - 0,031	0:29	0:58	8.2281	7.6696	0.5585	0.0275	1.3750
0,031 - 0,016	1:56	3:52	8.3195	7.7885	0.5310	0.0088	0.4400
0,016 - 0,008	7:44	15:28	7.8721	7.3499	0.5222	0.0162	0.8100
0,008 - 0,004	31:00	62:00	8.2933	7.7873	0.5060	0.0100	0.5000
<0,004	123:00	246:00	7.2375	6.7415	0.4960	0.4960	24.8000

**PENEIRAMENTO**

**CÁLCULOS PARA CURVA ACUMULATIVA E HISTOGRAMA**

Granulometria (mm)	Massa (g)	M.corrig (g)	Prp.massa (%)	Prp.acumulada (%)	Wentworth	Krumbein (phi)
4,000 - 2,830	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	grânulo	
2,830 - 2,000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	grânulo	0.0000
2,000 - 1,410	0.5374	0.6294	1.0332	1.0332	areia mt.grossa	
1,410 - 1,000	0.6440	0.7543	1.2382	2.2714	areia mt.grossa	2.27
1,000 - 0,707	1.2751	1.4935	2.4516	4.7230	areia grossa	
0,707 - 0,500	1.8977	2.2227	3.6486	8.3716	areia grossa	6.10
0,500 - 0,354	3.4151	4.0000	6.5660	14.9376	areia média	
0,354 - 0,250	3.5177	4.1202	6.7633	21.7009	areia média	13.33
0,250 - 0,177	3.6778	4.3077	7.0711	28.7720	areia fina	
0,177 - 0,125	4.4592	5.2230	8.5735	37.3455	areia fina	15.64
0,125 - 0,088	2.9926	3.5052	5.7537	43.0992	areia mt.fina	
0,088 - 0,062	1.6700	1.9560	3.2108	46.3101	areia mt.fina	8.96
<0,062* (fundo)	1.0880	1.2743			silte/argila	
0,062 - 0,031	1.3750	1.6105	2.6436	48.9537	silte grosso	
0,031 - 0,016	0.4400	0.5154	0.8460	49.7997	silte médio	
0,016 - 0,008	0.8100	0.9487	1.5573	51.3570	silte fino	
0,008 - 0,004	0.5000	0.5856	0.9613	52.3183	silte mt. fino	6.0
<0,004	24.8000	29.0477	47.6817	100.0000	argila	47.7
Total	52.0116	60.9200	100.0000			

**IGcUSP - GSA - LABSED**

Data: 06/04/06

<b>Amostra: S-47 (3,4-3,5) 28/10/05</b>		<b>Massa dispersante (g): 1.00</b>	
<b>*Antes da separação granulométrica*</b>		<b>*Após a separação granulométrica*</b>	
Massa total inicial - Mi (g)	60.90	Partículas 4,000 - 0,062 (g)	16.1779
Massa dos seixos (g)	0	Partículas menores 0,062 (g)	41.7000
Eliminação ataque químico (g)	0	Massa total final - Mf (g)	57.8779
Volume da proveta - Vp (ml)	1000	Fator de correção Mi/Mf	1.0522

**PIPETAGEM**

Granulometria (mm)	Tempo (min:s)		M. total (g)	M. frasco (g)	M. alíquota (g)	M. suspens alíq (g)	M susp. total (g)
	10cm	20cm	Mt	Mfr	Mt-Mfr-D		Ms*Vp/20
0,062 - 0,031	0:29	0:58	30.8506	29.9966	0.8340	0.0412	2.0600
0,031 - 0,016	1:56	3:52	24.8107	23.9979	0.7928	0.0410	2.0500
0,016 - 0,008	7:44	15:28	24.0222	23.2504	0.7518	0.0082	0.4100
0,008 - 0,004	31:00	62:00	25.2967	24.5331	0.7436	0.0414	2.0700
<0,004	123:00	246:00	10.3127	9.5905	0.7022	0.7022	35.1100

**PENEIRAMENTO**

**CÁLCULOS PARA CURVA ACUMULATIVA E HISTOGRAMA**

Granulometria (mm)	Massa (g)	M.corrig (g)	Prp.massa (%)	Prp.acumulada (%)	Wentworth	Krumbein (phi)
4,000 - 2,830	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	grânulo	
2,830 - 2,000	0.2381	0.2505	0.4114	0.4114	grânulo	0.41
2,000 - 1,410	0.2608	0.2744	0.4506	0.8620	areia mt.grossa	
1,410 - 1,000	0.5833	0.6138	1.0078	1.8698	areia mt.grossa	1.46
1,000 - 0,707	1.1602	1.2208	2.0046	3.8744	areia grossa	
0,707 - 0,500	1.3432	1.4133	2.3207	6.1951	areia grossa	4.33
0,500 - 0,354	2.3799	2.5042	4.1119	10.3070	areia média	
0,354 - 0,250	2.3740	2.4980	4.1017	14.4088	areia média	8.21
0,250 - 0,177	2.1141	2.2245	3.6527	18.0615	areia fina	
0,177 - 0,125	2.9843	3.1401	5.1562	23.2177	areia fina	8.81
0,125 - 0,088	1.8138	1.9085	3.1338	26.3515	areia mt.fina	
0,088 - 0,062	0.9262	0.9746	1.6003	27.9518	areia mt.fina	4.73
<0,062* (fundo)	0.6468	0.6806			silte/argila	
0,062 - 0,031	2.0600	2.1676	3.5592	31.5110	silte grosso	
0,031 - 0,016	2.0500	2.1570	3.5419	35.0529	silte médio	
0,016 - 0,008	0.4100	0.4314	0.7084	35.7613	silte fino	
0,008 - 0,004	2.0700	2.1781	3.5765	39.3378	silte mt. fino	11.4
<0,004	35.1100	36.9433	60.6622	100.0000	argila	60.7
<b>Total</b>	<b>57.8779</b>	<b>60.9000</b>	<b>100.0000</b>			

**IGcUSP - GSA - LABSED**

**Data:09/04/06**

<b>Amostra:S Sub N (3,9-,1) 27/03/05</b>		<b>Massa dispersante (g): 1.00</b>	
<b>*Antes da separação granulométrica*</b>		<b>*Após a separação granulométrica*</b>	
Massa total inicial - Mi (g)	62.23	Partículas 4,000 - 0,062 (g)	31.1135
Massa dos seixos (g)	0	Partículas menores 0,062 (g)	32.2000
Eliminação ataque químico (g)	0	Massa total final - Mf (g)	63.3135
Volume da proveta - Vp (ml)	1000	Fator de correção Mi/Mf	0.9829

**PIPETAGEM**

Granulometria (mm)	Tempo (min:s)		M. total (g)	M. frasco (g)	M.alíquota (g)	M.suspens alíq (g)	M susp.total (g)
	10cm	20cm	Mt	Mfr	Mt-Mfr-D	Ms	Ms*Vp/20
0,062 - 0,031	0:29	0:58	7.0942	6.4302	0.6440	0.1472	7.3600
0,031 - 0,016	1:56	3:52	10.1995	9.6827	0.4968	0.0776	3.8800
0,016 - 0,008	7:44	15:28	12.4906	12.0514	0.4192	0.0909	4.5450
0,008 - 0,004	31:00	62:00	10.2544	9.9061	0.3283	0.1647	8.2350
<0,004	123:00	246:00	11.8915	11.7079	0.1636	0.1636	8.1800

**PENEIRAMENTO**

**CÁLCULOS PARA CURVA ACUMULATIVA E HISTOGRAMA**

Granulometria (mm)	Massa (g)	M.corrig (g)	Prp.massa (%)	Prp.acumulada (%)	Wentworth	Krumbein (phi)
4,000 - 2,830	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	grânulo	
2,830 - 2,000	0.1920	0.1887	0.3033	0.3033	grânulo	0.30
2,000 - 1,410	0.0350	0.0344	0.0553	0.3585	areia mt.grossa	
1,410 - 1,000	0.4610	0.4531	0.7281	1.0867	areia mt.grossa	0.78
1,000 - 0,707	0.5075	0.4988	0.8016	1.8882	areia grossa	
0,707 - 0,500	3.7291	3.6653	5.8899	7.7781	areia grossa	6.69
0,500 - 0,354	4.0631	3.9936	6.4174	14.1956	areia média	
0,354 - 0,250	4.1676	4.0963	6.5825	20.7780	areia média	13.00
0,250 - 0,177	4.7963	4.7142	7.5755	28.3535	areia fina	
0,177 - 0,125	4.3220	4.2480	6.8263	35.1799	areia fina	14.40
0,125 - 0,088	5.1361	5.0482	8.1122	43.2920	areia mt.fina	
0,088 - 0,062	3.7038	3.6404	5.8499	49.1420	areia mt.fina	13.96
<0,062* (fundo)	4.3766	4.3017			silte/argila	
0,062 - 0,031	7.3600	7.2340	11.6247	60.7667	silte grosso	
0,031 - 0,016	3.8800	3.8136	6.1282	66.8949	silte médio	
0,016 - 0,008	4.5450	4.4672	7.1786	74.0735	silte fino	
0,008 - 0,004	8.2350	8.0941	13.0067	87.0802	silte mt. fino	37.9
<0,004	8.1800	8.0400	12.9198	100.0000	argila	12.9
<b>Total</b>	<b>63.3135</b>	<b>62.2300</b>	<b>100.0000</b>			

**IGcUSP - GSA - LABSED**

Data: 06/04/06

Amostra: S Sub N (3,5-3,8) 28/10/05

Massa dispersante (g): 1.00

**\*Antes da separação granulométrica\***

**\*Após a separação granulométrica\***

Massa total inicial - Mi (g)	62.26	Partículas 4,000 - 0,062 (g)	26.0095
Massa dos seixos (g)	0	Partículas menores 0,062 (g)	34.6050
Eliminação ataque químico (g)	0	Massa total final - Mf (g)	60.6145
Volume da proveta - Vp (ml)	1000	Fator de correção Mi/Mf	1.0271

**PIPETAGEM**

Granulometria (mm)	Tempo (min:s)		M. total (g)	M. frasco (g)	M. alíquota (g)	M. suspens alíq (g)	M susp. total (g)
	10cm	20cm	Mt	Mfr	Mt-Mfr-D	Ms	Ms*Vp/20
0,062 - 0,031	0:29	0:58	13.1549	12.4428	0.6921	0.0685	3.4250
0,031 - 0,016	1:56	3:52	30.6462	30.0026	0.6236	0.0058	0.2900
0,016 - 0,008	7:44	15:28	48.4690	47.8312	0.6178	0.0046	0.2300
0,008 - 0,004	31:00	62:00	24.0755	23.4423	0.6132	0.0348	1.7400
<0,004	123:00	246:00	13.9879	13.3895	0.5784	0.5784	28.9200

**PENEIRAMENTO**

**CÁLCULOS PARA CURVA ACUMULATIVA E HISTOGRAMA**

Granulometria (mm)	Massa (g)	M.corrig (g)	Prp.massa (%)	Prp.acumulada (%)	Wentworth	Krumbein (phi)
4,000 - 2,830	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	grânulo	
2,830 - 2,000	0.1069	0.1098	0.1764	0.1764	grânulo	0.18
2,000 - 1,410	0.2211	0.2271	0.3648	0.5411	areia mt.grossa	
1,410 - 1,000	0.9846	1.0113	1.6244	2.1655	areia mt.grossa	1.99
1,000 - 0,707	0.8446	0.8675	1.3934	3.5589	areia grossa	
0,707 - 0,500	3.6132	3.7113	5.9609	9.5198	areia grossa	7.35
0,500 - 0,354	3.3433	3.4341	5.5157	15.0355	areia média	
0,354 - 0,250	3.9265	4.0331	6.4778	21.5133	areia média	11.99
0,250 - 0,177	4.2356	4.3506	6.9878	28.5011	areia fina	
0,177 - 0,125	3.5571	3.6537	5.8684	34.3695	areia fina	12.86
0,125 - 0,088	3.0620	3.1451	5.0516	39.4211	areia mt.fina	
0,088 - 0,062	2.1146	2.1720	3.4886	42.9097	areia mt.fina	8.54
<0,062* (fundo)	0.0000	0.0000			silte/argila	
0,062 - 0,031	3.4250	3.5180	5.6505	48.5602	silte grosso	
0,031 - 0,016	0.2900	0.2979	0.4784	49.0386	silte médio	
0,016 - 0,008	0.2300	0.2362	0.3794	49.4180	silte fino	
0,008 - 0,004	1.7400	1.7872	2.8706	52.2886	silte mt. fino	9.4
<0,004	28.9200	29.7051	47.7114	100.0000	argila	47.7
Total	60.6145	62.2600	100.0000			

**IGcUSP - GSA - LABSED**

**Data: 03/04/06**

**Amostra: S Sub SE (2,1-2,4) 27/03/05**

**Massa dispersante (g): 1.00**

**\*Antes da separação granulométrica\***

**\*Após a separação granulométrica\***

Massa total inicial - Mi (g)	60.59	Partículas 4,000 - 0,062 (g)	30.1798
Massa dos seixos (g)	0	Partículas menores 0,062 (g)	31.3100
Eliminação ataque químico (g)	0	Massa total final - Mf (g)	61.4898
Volume da proveta - Vp (ml)	1000	Fator de correção Mi/Mf	0.9854

**PIPETAGEM**

Granulometria (mm)	Tempo (min:s)		M. total (g)	M. frasco (g)	M.alíquota (g)	M.suspens alíq (g)	M susp.total (g)
	10cm	20cm	Mt	Mfr	Mt-Mfr-D	Ms	Ms*Vp/20
0,062 - 0,031	0:29	0:58	13.0906	12.4444	0.6262	0.1255	6.2750
0,031 - 0,016	1:56	3:52	12.9814	12.4607	0.5007	0.0838	4.1900
0,016 - 0,008	7:44	15:28	9.8628	9.4259	0.4169	0.0381	1.9050
0,008 - 0,004	31:00	62:00	9.9988	9.6000	0.3788	0.0954	4.7700
<0,004	123:00	246:00	6.6617	6.3583	0.2834	0.2834	14.1700

**PENEIRAMENTO**

**CÁLCULOS PARA CURVA ACUMULATIVA E HISTOGRAMA**

Granulometria (mm)	Massa (g)	M.corrig (g)	Prp.massa (%)	Prp.acumulada (%)	Wentworth	Krumbein (phi)
4,000 - 2,830	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	grânulo	
2,830 - 2,000	0.0707	0.0697	0.1150	0.1150	grânulo	0.11
2,000 - 1,410	0.3984	0.3926	0.6479	0.7629	areia mt.grossa	
1,410 - 1,000	1.2628	1.2443	2.0537	2.8166	areia mt.grossa	2.70
1,000 - 0,707	2.1532	2.1217	3.5017	6.3183	areia grossa	
0,707 - 0,500	2.7296	2.6897	4.4391	10.7574	areia grossa	7.94
0,500 - 0,354	4.2065	4.1449	6.8410	17.5984	areia média	
0,354 - 0,250	4.0616	4.0022	6.6053	24.2037	areia média	13.45
0,250 - 0,177	3.8337	3.7776	6.2347	30.4384	areia fina	
0,177 - 0,125	4.8337	4.7630	7.8610	38.2994	areia fina	14.10
0,125 - 0,088	3.7742	3.7190	6.1379	44.4373	areia mt.fina	
0,088 - 0,062	2.8554	2.8136	4.6437	49.0810	areia mt.fina	10.78
<0,062* (fundo)	5.1870	5.1111			silte/argila	
0,062 - 0,031	6.2750	6.1832	10.2049	59.2859	silte grosso	
0,031 - 0,016	4.1900	4.1287	6.8141	66.1001	silte médio	
0,016 - 0,008	1.9050	1.8771	3.0981	69.1981	silte fino	
0,008 - 0,004	4.7700	4.7002	7.7574	76.9555	silte mt. fino	27.9
<0,004	14.1700	13.9626	23.0445	100.0000	argila	23.0
<b>Total</b>	<b>61.4898</b>	<b>60.5900</b>	<b>100.0000</b>			

**IGcUSP - GSA - LABSED**

Data: 03/04/06

Amostra: S Sub SE (1,5-1,9) 28/10/05

Massa dispersante (g): 1.00

**\*Antes da separação granulométrica\***

**\*Após a separação granulométrica\***

Massa total inicial - Mi (g)	61.17	Partículas 4,000 - 0,062 (g)	32.3183
Massa dos seixos (g)	0	Partículas menores 0,062 (g)	26.9050
Eliminação ataque químico (g)	0	Massa total final - Mf (g)	59.2233
Volume da proveta - Vp (ml)	1000	Fator de correção Mi/Mf	1.0329

**PIPETAGEM**

Granulometria (mm)	Tempo (min:s)		M. total (g)	M. frasco (g)	M.alíquota (g)	M.suspens alíq (g)	M susp.total (g)
	10cm	20cm	Mt	Mfr	Mt-Mfr-D	Ms	Ms*Vp/20
0,062 - 0,031	0:29	0:58	95.8893	95.3312	0.5381	0.0480	2.4000
0,031 - 0,016	1:56	3:52	8.2891	7.7790	0.4901	0.0461	2.3050
0,016 - 0,008	7:44	15:28	5.9829	5.5189	0.4440	0.0334	1.6700
0,008 - 0,004	31:00	62:00	5.8323	5.4017	0.4106	0.0004	0.0200
<0,004	123:00	246:00	5.7994	5.3692	0.4102	0.4102	20.5100

**PENEIRAMENTO**

**CÁLCULOS PARA CURVA ACUMULATIVA E HISTOGRAMA**

Granulometria (mm)	Massa (g)	M.corrig (g)	Prp.massa (%)	Prp.acumulada (%)	Wentworth	Krumbein (phi)
4,000 - 2,830	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	grânulo	
2,830 - 2,000	0.1585	0.1637	0.2676	0.2676	grânulo	0.27
2,000 - 1,410	0.3807	0.3932	0.6428	0.9105	areia mt.grossa	
1,410 - 1,000	1.3333	1.3771	2.2513	3.1618	areia mt.grossa	2.89
1,000 - 0,707	2.3792	2.4574	4.0173	7.1791	areia grossa	
0,707 - 0,500	3.6628	3.7832	6.1847	13.3638	areia grossa	10.20
0,500 - 0,354	3.8804	4.0080	6.5522	19.9160	areia média	
0,354 - 0,250	4.8306	4.9894	8.1566	28.0726	areia média	14.71
0,250 - 0,177	3.9614	4.0916	6.6889	34.7615	areia fina	
0,177 - 0,125	5.8010	5.9917	9.7951	44.5566	areia fina	16.48
0,125 - 0,088	3.4366	3.5496	5.8028	50.3594	areia mt.fina	
0,088 - 0,062	2.4938	2.5758	4.2108	54.5702	areia mt.fina	10.01
<0,062* (fundo)	1.8479	1.9086			silte/argila	
0,062 - 0,031	2.4000	2.4789	4.0525	58.6227	silte grosso	
0,031 - 0,016	2.3050	2.3808	3.8920	62.5148	silte médio	
0,016 - 0,008	1.6700	1.7249	2.8198	65.3346	silte fino	
0,008 - 0,004	0.0200	0.0207	0.0338	65.3684	silte mt. fino	10.8
<0,004	20.5100	21.1842	34.6316	100.0000	argila	34.6
Total	59.2233	61.1700	100.0000			

**IGcUSP - GSA - LABSED**

Data: 06/04/06

<b>Amostra: S Sub W (1,7-2,1) 28/10/05</b>		<b>Massa dispersante (g): 1.00</b>	
<b>*Antes da separação granulométrica*</b>		<b>*Após a separação granulométrica*</b>	
Massa total inicial - Mi (g)	61.15	Partículas 4,000 - 0,062 (g)	25.3079
Massa dos seixos (g)	0	Partículas menores 0,062 (g)	32.9650
Eliminação ataque químico (g)	0	Massa total final - Mf (g)	58.2729
Volume da proveta - Vp (ml)	1000	Fator de correção Mi/Mf	1.0494

**PIPETAGEM**

Granulometria (mm)	Tempo (min:s)		M. total (g)	M. frasco (g)	M. alíquota (g)	M. suspens alíq (g)	M susp. total (g)
	10cm	20cm	Mt	Mfr	Mt-Mfr-D	Ms	Ms*Vp/20
0,062 - 0,031	0:29	0:58	6.5181	5.8388	0.6593	0.0120	0.6000
0,031 - 0,016	1:56	3:52	25.1694	24.5021	0.6473	0.0166	0.8300
0,016 - 0,008	7:44	15:28	7.3871	6.7364	0.6307	0.0254	1.2700
0,008 - 0,004	31:00	62:00	10.1042	9.4789	0.6053	0.0109	0.5450
<0,004	123:00	246:00	13.7230	13.1086	0.5944	0.5944	29.7200

**PENEIRAMENTO**

**CÁLCULOS PARA CURVA ACUMULATIVA E HISTOGRAMA**

Granulometria (mm)	Massa (g)	M.corrig (g)	Prp.massa (%)	Prp.acumulada (%)	Wentworth	Krumbein (phi)
4,000 - 2,830	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	grânulo	
2,830 - 2,000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	grânulo	0.00
2,000 - 1,410	0.3674	0.3855	0.6305	0.6305	areia mt.grossa	
1,410 - 1,000	0.3912	0.4105	0.6713	1.3018	areia mt.grossa	1.30
1,000 - 0,707	1.7234	1.8085	2.9575	4.2593	areia grossa	
0,707 - 0,500	2.9800	3.1271	5.1139	9.3731	areia grossa	8.07
0,500 - 0,354	2.8484	2.9890	4.8880	14.2612	areia média	
0,354 - 0,250	3.3845	3.5516	5.8080	20.0692	areia média	10.70
0,250 - 0,177	4.5186	4.7417	7.7542	27.8234	areia fina	
0,177 - 0,125	3.8020	3.9897	6.5245	34.3479	areia fina	14.28
0,125 - 0,088	3.6168	3.7954	6.2067	40.5545	areia mt.fina	
0,088 - 0,062	1.6756	1.7583	2.8754	43.4300	areia mt.fina	9.08
<0,062* (fundo)	0.8897	0.9336			silte/argila	
0,062 - 0,031	0.6000	0.6296	1.0296	44.4596	silte grosso	
0,031 - 0,016	0.8300	0.8710	1.4243	45.8839	silte médio	
0,016 - 0,008	1.2700	1.3327	2.1794	48.0633	silte fino	
0,008 - 0,004	0.5450	0.5719	0.9353	48.9986	silte mt. fino	5.6
<0,004	29.7200	31.1874	51.0014	100.0000	argila	51.0
Total	58.2729	61.1500	100.0000			

**IGcUSP - GSA - LABSED**

**Data: 09/04/06**

**Amostra: Lago N Sed N (3,5-3,9) 27/03/05**

**Massa dispersante (g): 1.00**

**\*Antes da separação granulométrica\***

**\*Após a separação granulométrica\***

Massa total inicial - Mi (g)	55.38	Partículas 4,000 - 0,062 (g)	37.2079
Massa dos seixos (g)	0	Partículas menores 0,062 (g)	18.1000
Eliminação ataque químico (g)	0	Massa total final - Mf (g)	55.3079
Volume da proveta - Vp (ml)	1000	Fator de correção Mi/Mf	1.0013

**PIPETAGEM**

Granulometria (mm)	Tempo (min:s)		M. total (g)	M. frasco (g)	M.alíquota (g)	M.suspens alíq (g)	M susp.total (g)
	10cm	20cm	Mt	Mfr	Mt-Mfr-D	Ms	Ms*Vp/20
0,062 - 0,031	0:29	0:58	5.9413	5.5593	0.3620	0.0414	2.0700
0,031 - 0,016	1:56	3:52	8.8791	8.5385	0.3206	0.1166	5.8300
0,016 - 0,008	7:44	15:28	7.0048	6.7808	0.2040	0.0203	1.0150
0,008 - 0,004	31:00	62:00	11.2836	11.0799	0.1837	0.0543	2.7150
<0,004	123:00	246:00	13.2724	13.1230	0.1294	0.1294	6.4700

**PENEIRAMENTO**

**CÁLCULOS PARA CURVA ACUMULATIVA E HISTOGRAMA**

Granulometria (mm)	Massa (g)	M.corrig (g)	Prp.massa (%)	Prp.acumulada (%)	Wentworth	Krumbein (phi)
4,000 - 2,830	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	grânulo	
2,830 - 2,000	16.7658	16.7877	30.3136	30.3136	grânulo	30.31
2,000 - 1,410	3.8997	3.9048	7.0509	37.3645	areia mt.grossa	
1,410 - 1,000	5.1027	5.1094	9.2260	46.5905	areia mt.grossa	16.28
1,000 - 0,707	1.6899	1.6921	3.0554	49.6459	areia grossa	
0,707 - 0,500	3.3767	3.3811	6.1053	55.7512	areia grossa	9.16
0,500 - 0,354	1.5437	1.5457	2.7911	58.5423	areia média	
0,354 - 0,250	1.3886	1.3904	2.5107	61.0529	areia média	5.30
0,250 - 0,177	2.3128	2.3158	4.1817	65.2346	areia fina	
0,177 - 0,125	0.3960	0.3965	0.7160	65.9506	areia fina	4.90
0,125 - 0,088	0.4357	0.4363	0.7878	66.7384	areia mt.fina	
0,088 - 0,062	0.2963	0.2967	0.5357	67.2741	areia mt.fina	1.32
<0,062* (fundo)	0.3490	0.3495			silte/argila	
0,062 - 0,031	2.0700	2.0727	3.7427	71.0168	silte grosso	
0,031 - 0,016	5.8300	5.8376	10.5410	81.5578	silte médio	
0,016 - 0,008	1.0150	1.0163	1.8352	83.3930	silte fino	
0,008 - 0,004	2.7150	2.7185	4.9089	88.3019	silte mt. fino	21.0
<0,004	6.4700	6.4784	11.6981	100.0000	argila	11.7
Total	55.3079	55.3800	100.0000			

**IGcUSP - GSA - LABSED**

**Data:09/04/05**

**Amostra:Lago N sed N (3,0-3,5) 28/10/05**

**Massa dispersante (g): 1.00**

**\*Antes da separação granulométrica\***

**\*Após a separação granulométrica\***

Massa total inicial - Mi (g)	61.89	Partículas 4,000 - 0,062 (g)	27.1177
Massa dos seixos (g)	0	Partículas menores 0,062 (g)	33.6300
Eliminação ataque químico (g)	0	Massa total final - Mf (g)	60.7477
Volume da proveta - Vp (ml)	1000	Fator de correção Mi/Mf	1.0188

**PIPETAGEM**

Granulometria (mm)	Tempo (min:s)		M. total (g)	M. frasco (g)	M.alíquota (g)	M.suspens alíq (g)	M susp.total (g)
	10cm	20cm	Mt	Mfr	Mt-Mfr-D	Ms	Ms*Vp/20
0,062 - 0,031	0:29	0:58	9.6136	8.9210	0.6726	0.0827	4.1350
0,031 - 0,016	1:56	3:52	12.1287	11.5188	0.5899	0.1191	5.9550
0,016 - 0,008	7:44	15:28	7.2205	6.7297	0.4708	0.1200	6.0000
0,008 - 0,004	31:00	62:00	24.8535	24.4827	0.3508	0.1705	8.5250
<0,004	123:00	246:00	9.7378	9.5375	0.1803	0.1803	9.0150

**PENEIRAMENTO**

**CÁLCULOS PARA CURVA ACUMULATIVA E HISTOGRAMA**

Granulometria (mm)	Massa (g)	M.corrig (g)	Prp.massa (%)	Prp.acumulada (%)	Wentworth	Krumbein (phi)
4,000 - 2,830	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	grânulo	
2,830 - 2,000	0.7019	0.7151	1.1554	1.1554	grânulo	1.16
2,000 - 1,410	1.5616	1.5910	2.5706	3.7261	areia mt.grossa	
1,410 - 1,000	3.8858	3.9589	6.3966	10.1227	areia mt.grossa	8.97
1,000 - 0,707	1.9004	1.9361	3.1283	13.2510	areia grossa	
0,707 - 0,500	3.9371	4.0111	6.4811	19.7321	areia grossa	9.61
0,500 - 0,354	2.2198	2.2615	3.6541	23.3862	areia média	
0,354 - 0,250	2.0969	2.1363	3.4518	26.8381	areia média	7.11
0,250 - 0,177	3.2239	3.2845	5.3070	32.1451	areia fina	
0,177 - 0,125	2.4156	2.4610	3.9764	36.1215	areia fina	9.28
0,125 - 0,088	3.0148	3.0715	4.9628	41.0844	areia mt.fina	
0,088 - 0,062	2.1599	2.2005	3.5555	44.6399	areia mt.fina	8.52
<0,062* (fundo)	2.5225	2.5699			silte/argila	
0,062 - 0,031	4.1350	4.2128	6.8068	51.4467	silte grosso	
0,031 - 0,016	5.9550	6.0670	9.8028	61.2496	silte médio	
0,016 - 0,008	6.0000	6.1128	9.8769	71.1265	silte fino	
0,008 - 0,004	8.5250	8.6853	14.0335	85.1599	silte mt. fino	40.5
<0,004	9.0150	9.1845	14.8401	100.0000	argila	14.8
Total	60.7477	61.8900	100.0000			

**IGcUSP - GSA - LABSED**

Data: 06/04/06

<b>Amostra: SED SE (1,8-2,1) 27/03/05</b>		<b>Massa dispersante (g):</b> 1.00	
<b>*Antes da separação granulométrica*</b>		<b>*Após a separação granulométrica*</b>	
Massa total inicial - Mi (g)	61.87	Partículas 4,000 - 0,062 (g)	26.2300
Massa dos seixos (g)	0	Partículas menores 0,062 (g)	36.8900
Eliminação ataque químico (g)	0	Massa total final - Mf (g)	63.1200
Volume da proveta - Vp (ml)	1000	Fator de correção Mi/Mf	0.9802

**PIPETAGEM**

Granulometria (mm)	Tempo (min:s)		M. total (g)	M. frasco (g)	M. alíquota (g)	M. suspens alíq (g)	M susp. total (g)
	10cm	20cm	Mt	Mfr	Mt-Mfr-D	Ms	Ms*Vp/20
0,062 - 0,031	0:29	0:58	9.8825	9.1247	0.7378	0.0822	4.1100
0,031 - 0,016	1:56	3:52	25.3795	24.7039	0.6556	0.0676	3.3800
0,016 - 0,008	7:44	15:28	13.0684	12.4604	0.5880	0.0688	3.4400
0,008 - 0,004	31:00	62:00	25.0518	24.5126	0.5192	0.0678	3.3900
<0,004	123:00	246:00	95.8072	95.3358	0.4514	0.4514	22.5700

**PENEIRAMENTO**

**CÁLCULOS PARA CURVA ACUMULATIVA E HISTOGRAMA**

Granulometria (mm)	Massa (g)	M.corrig (g)	Prp.massa (%)	Prp.acumulada (%)	Wentworth	Krumbein (phi)
4,000 - 2,830	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	grânulo	
2,830 - 2,000	0.1190	0.1166	0.1885	0.1885	grânulo	0.19
2,000 - 1,410	0.1773	0.1738	0.2809	0.4694	areia mt.grossa	
1,410 - 1,000	0.9561	0.9372	1.5147	1.9842	areia mt.grossa	1.80
1,000 - 0,707	0.7106	0.6965	1.1258	3.1099	areia grossa	
0,707 - 0,500	3.0185	2.9587	4.7822	7.8921	areia grossa	5.91
0,500 - 0,354	3.0764	3.0155	4.8739	12.7660	areia média	
0,354 - 0,250	3.7760	3.7012	5.9823	18.7483	areia média	10.86
0,250 - 0,177	4.1668	4.0843	6.6014	25.3497	areia fina	
0,177 - 0,125	3.8448	3.7687	6.0913	31.4409	areia fina	12.69
0,125 - 0,088	3.5930	3.5218	5.6923	37.1332	areia mt.fina	
0,088 - 0,062	2.7915	2.7362	4.4225	41.5558	areia mt.fina	10.11
<0,062* (fundo)	2.0930	2.0516			silte/argila	
0,062 - 0,031	4.1100	4.0286	6.5114	48.0672	silte grosso	
0,031 - 0,016	3.3800	3.3131	5.3549	53.4221	silte médio	
0,016 - 0,008	3.4400	3.3719	5.4499	58.8720	silte fino	
0,008 - 0,004	3.3900	3.3229	5.3707	64.2427	silte mt. fino	22.7
<0,004	22.5700	22.1230	35.7573	100.0000	argila	35.8
<b>Total</b>	<b>63.1200</b>	<b>61.8700</b>	<b>100.0000</b>			

**IGcUSP - GSA - LABSED**

Data: 09/04/06

<b>Amostra: Sed SE (1,2-1,5) 28/10/05</b>		<b>Massa dispersante (g):</b> 1.00	
<b>*Antes da separação granulométrica*</b>		<b>*Após a separação granulométrica*</b>	
Massa total inicial - Mi (g)	61.86	Partículas 4,000 - 0,062 (g)	32.5327
Massa dos seixos (g)	0	Partículas menores 0,062 (g)	26.3450
Eliminação ataque químico (g)	0	Massa total final - Mf (g)	58.8777
Volume da proveta - Vp (ml)	1000	Fator de correção Mi/Mf	1.0507

**PIPETAGEM**

Granulometria (mm)	Tempo (min:s)		M. total (g)	M. frasco (g)	M. alíquota (g)	M. suspens alíq (g)	M susp. total (g)
	10cm	20cm	Mt	Mfr	Mt-Mfr-D	Ms	Ms*Vp/20
0,062 - 0,031	0:29	0:58	19.9783	19.4314	0.5269	0.0784	3.9200
0,031 - 0,016	1:56	3:52	6.3034	5.8349	0.4485	0.0583	2.9150
0,016 - 0,008	7:44	15:28	10.2112	9.8010	0.3902	0.0502	2.5100
0,008 - 0,004	31:00	62:00	9.6073	9.2473	0.3400	0.0570	2.8500
<0,004	123:00	246:00	9.4643	9.1613	0.2830	0.2830	14.1500

**PENEIRAMENTO**

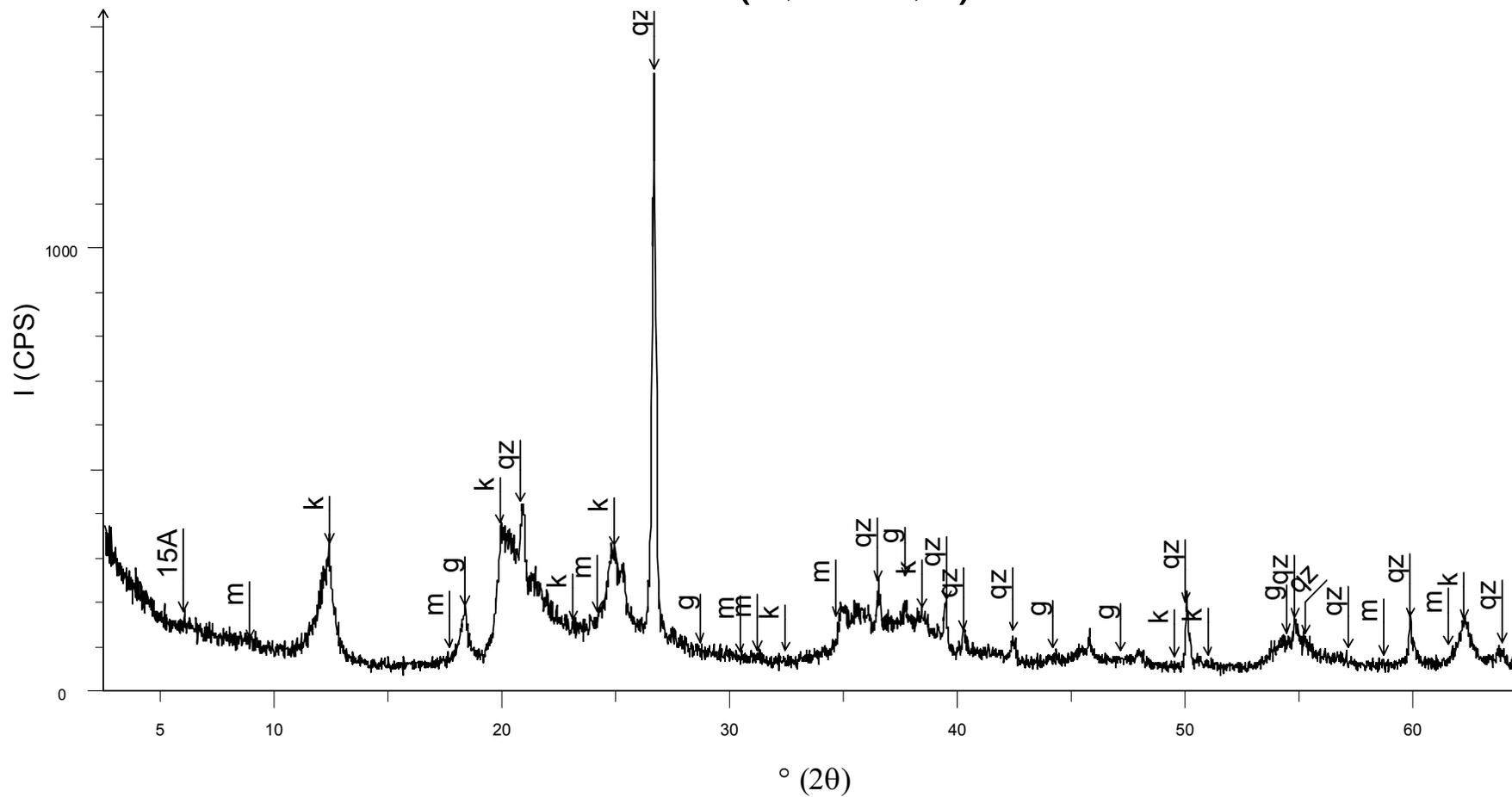
**CÁLCULOS PARA CURVA ACUMULATIVA E HISTOGRAMA**

Granulometria (mm)	Massa (g)	M.corrig (g)	Prp.massa (%)	Prp.acumulada (%)	Wentworth	Krumbein (phi)
4,000 - 2,830	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	grânulo	
2,830 - 2,000	0.2068	0.2173	0.3512	0.3512	grânulo	0.35
2,000 - 1,410	0.3115	0.3273	0.5291	0.8803	areia mt.grossa	
1,410 - 1,000	1.0886	1.1437	1.8489	2.7292	areia mt.grossa	2.38
1,000 - 0,707	0.9221	0.9688	1.5661	4.2953	areia grossa	
0,707 - 0,500	4.4830	4.7101	7.6141	11.9094	areia grossa	9.18
0,500 - 0,354	4.5877	4.8201	7.7919	19.7013	areia média	
0,354 - 0,250	5.0738	5.3308	8.6175	28.3189	areia média	16.41
0,250 - 0,177	5.5548	5.8362	9.4345	37.7533	areia fina	
0,177 - 0,125	4.4307	4.6551	7.5253	45.2786	areia fina	16.96
0,125 - 0,088	3.5724	3.7534	6.0675	51.3461	areia mt.fina	
0,088 - 0,062	2.3013	2.4179	3.9086	55.2547	areia mt.fina	9.98
<0,062* (fundo)	1.2595	1.3233			silte/argila	
0,062 - 0,031	3.9200	4.1186	6.6579	61.9126	silte grosso	
0,031 - 0,016	2.9150	3.0627	4.9509	66.8635	silte médio	
0,016 - 0,008	2.5100	2.6371	4.2631	71.1266	silte fino	
0,008 - 0,004	2.8500	2.9944	4.8405	75.9671	silte mt. fino	20.7
<0,004	14.1500	14.8667	24.0329	100.0000	argila	24.0
<b>Total</b>	<b>58.8777</b>	<b>61.8600</b>	<b>100.0000</b>			

IGcUSP - GSA - LABSED							
Data: 03/04/06							
Amostra: Sed W (1,4-1,7) 28/10/05			Massa dispersante (g):		1.00		
*Antes da separação granulométrica*			*Após a separação granulométrica*				
Massa total inicial - Mi (g)		60.29		Partículas 4,000 - 0,062 (g)		39.8733	
Massa dos seixos (g)		0		Partículas menores 0,062 (g)		25.9450	
Eliminação ataque químico (g)		0		Massa total final - Mf (g)		65.8183	
Volume da proveta - Vp (ml)		1000		Fator de correção Mi/Mf		0.9160	
PIPETAGEM							
Granulometria	Tempo (min:s)		M. total (g)	M. frasco (g)	M. alíquota (g)	M. suspens alíq (g)	M susp.total (g)
(mm)	10cm	20cm	Mt	Mfr	Mt-Mfr-D	Ms	Ms*Vp/20
0,062 - 0,031	0:29	0:58	24.5831	24.0442	0.5189	0.2747	13.7350
0,031 - 0,016	1:56	3:52	24.7422	24.4780	0.2442	0.2045	10.2250
0,016 - 0,008	7:44	15:28	12.7277	12.6680	0.0397	0.0256	1.2800
0,008 - 0,004	31:00	62:00	13.1366	13.1025	0.0141	0.0048	0.2400
<0,004	123:00	246:00	6.7592	6.7299	0.0093	0.0093	0.4650
PENEIRAMENTO			CÁLCULOS PARA CURVA ACUMULATIVA E HISTOGRAMA				
Granulometria (mm)	Massa (g)	M.corrig (g)	Prp.massa (%)	Prp.acumulada (%)	Wentworth	Krumbein (phi)	
4,000 - 2,830	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	grânulo		
2,830 - 2,000	0.1961	0.1796	0.2979	0.2979	grânulo	0.30	
2,000 - 1,410	0.1524	0.1396	0.2315	0.5295	areia mt.grossa		
1,410 - 1,000	0.5083	0.4656	0.7723	1.3018	areia mt.grossa	1.00	
1,000 - 0,707	0.5045	0.4621	0.7665	2.0683	areia grossa		
0,707 - 0,500	2.8227	2.5856	4.2886	6.3569	areia grossa	5.06	
0,500 - 0,354	2.8160	2.5795	4.2784	10.6353	areia média		
0,354 - 0,250	4.5343	4.1534	6.8891	17.5245	areia média	11.17	
0,250 - 0,177	12.5849	11.5279	19.1207	36.6451	areia fina		
0,177 - 0,125	4.0568	3.7161	6.1636	42.8088	areia fina	25.28	
0,125 - 0,088	9.2395	8.4634	14.0379	56.8467	areia mt.fina		
0,088 - 0,062	2.4578	2.2514	3.7342	60.5809	areia mt.fina	17.77	
<0,062* (fundo)	0.8743	0.8009			silte/argila		
0,062 - 0,031	13.7350	12.5814	20.8681	81.4489	silte grosso		
0,031 - 0,016	10.2250	9.3662	15.5352	96.9841	silte médio		
0,016 - 0,008	1.2800	1.1725	1.9447	98.9289	silte fino		
0,008 - 0,004	0.2400	0.2198	0.3646	99.2935	silte mt. fino	38.7	
<0,004	0.4650	0.4259	0.7065	100.0000	argila	0.7	
Total	65.8183	60.2900	100.0000				

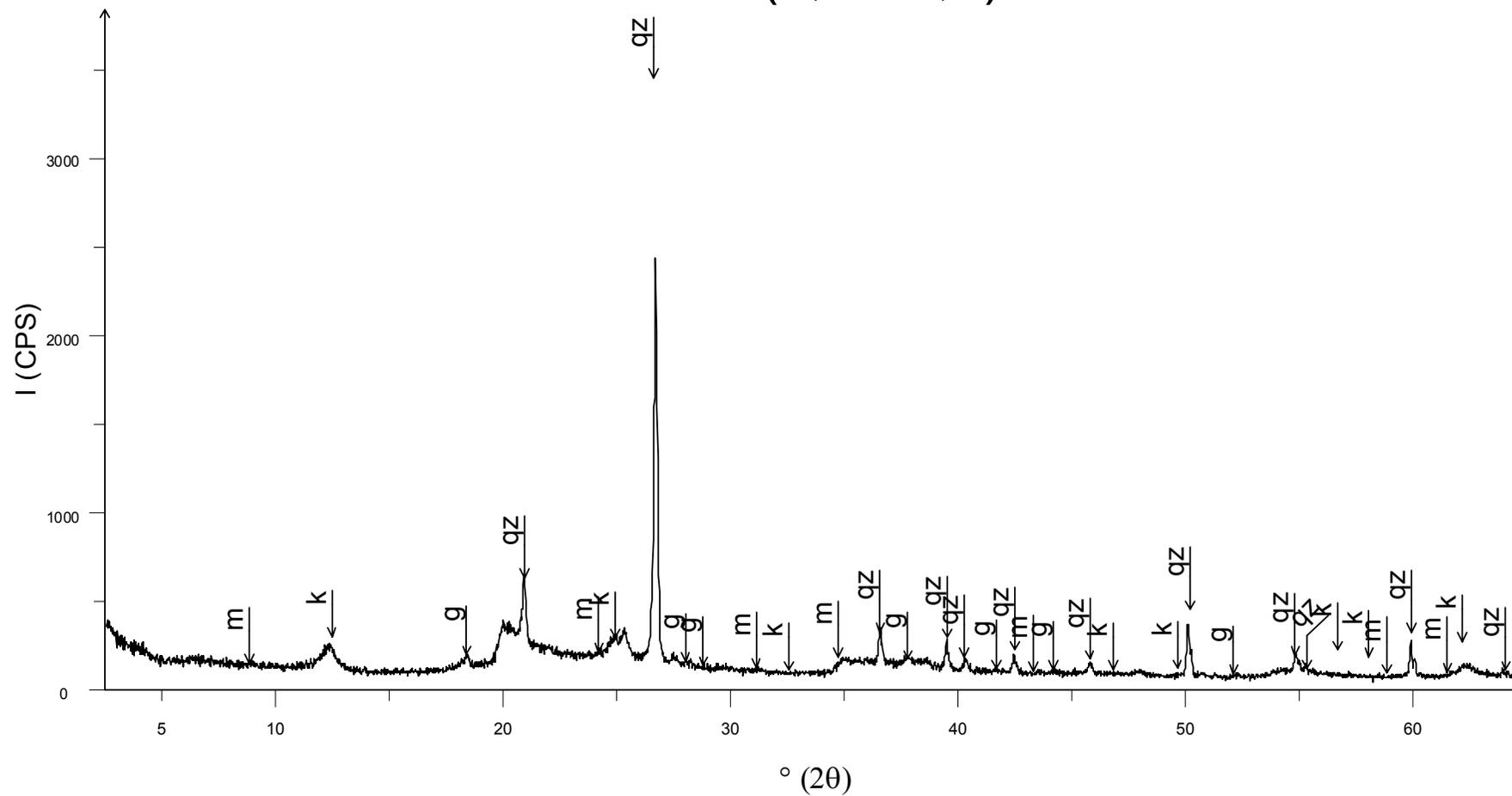
**ANEXO VII**  
**DIFRATOGRAMAS DRX**

# Sed N (3,5 - 3,9)



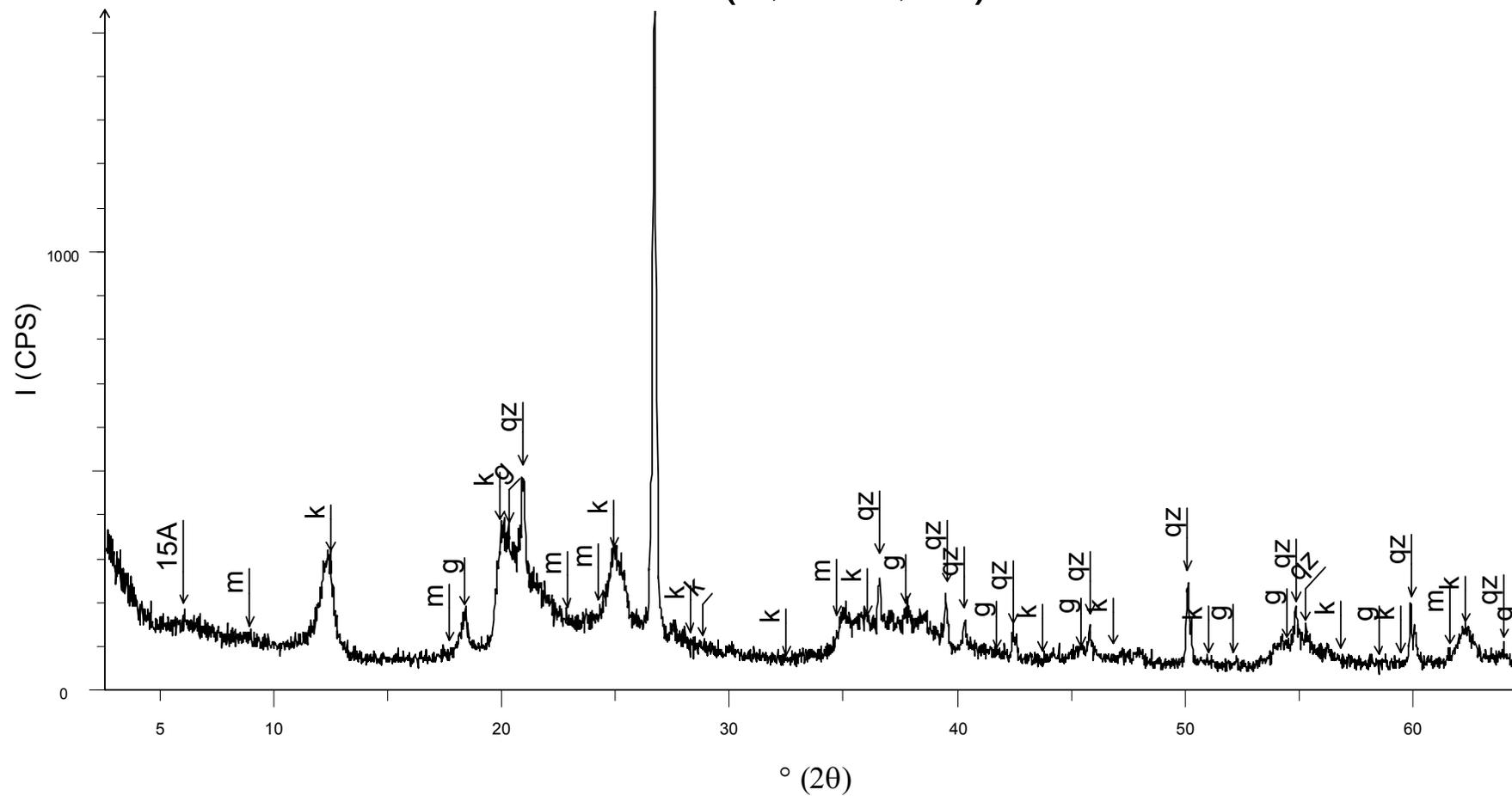
⚠ Sed N (3,5 - 3,9) - File: 106-0722.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.50 ° - End: 70.00 ° - Step: 0.02 ° - Step time: 1. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 2.50 ° - Theta: 1.25 ° -

# S Sub N (3,9 - 4,1)



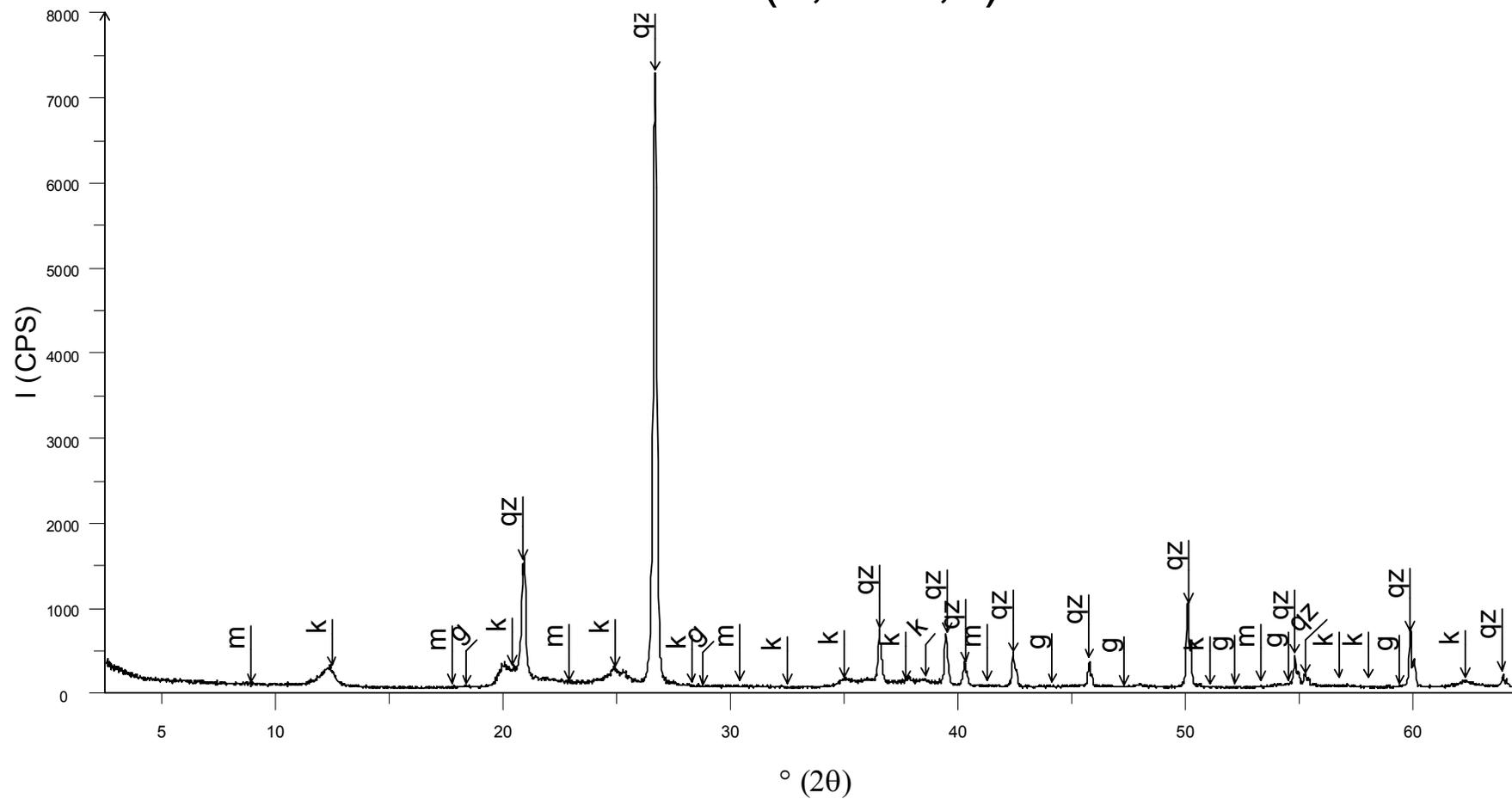
⚠ S Sub N (3,9 - 4,1) - File: 106-0721.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.50 ° - End: 70.00 ° - Step: 0.02 ° - Step time: 1. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 2.50 ° - Theta: 1.25

# Sed N (3,0 - 3,05)



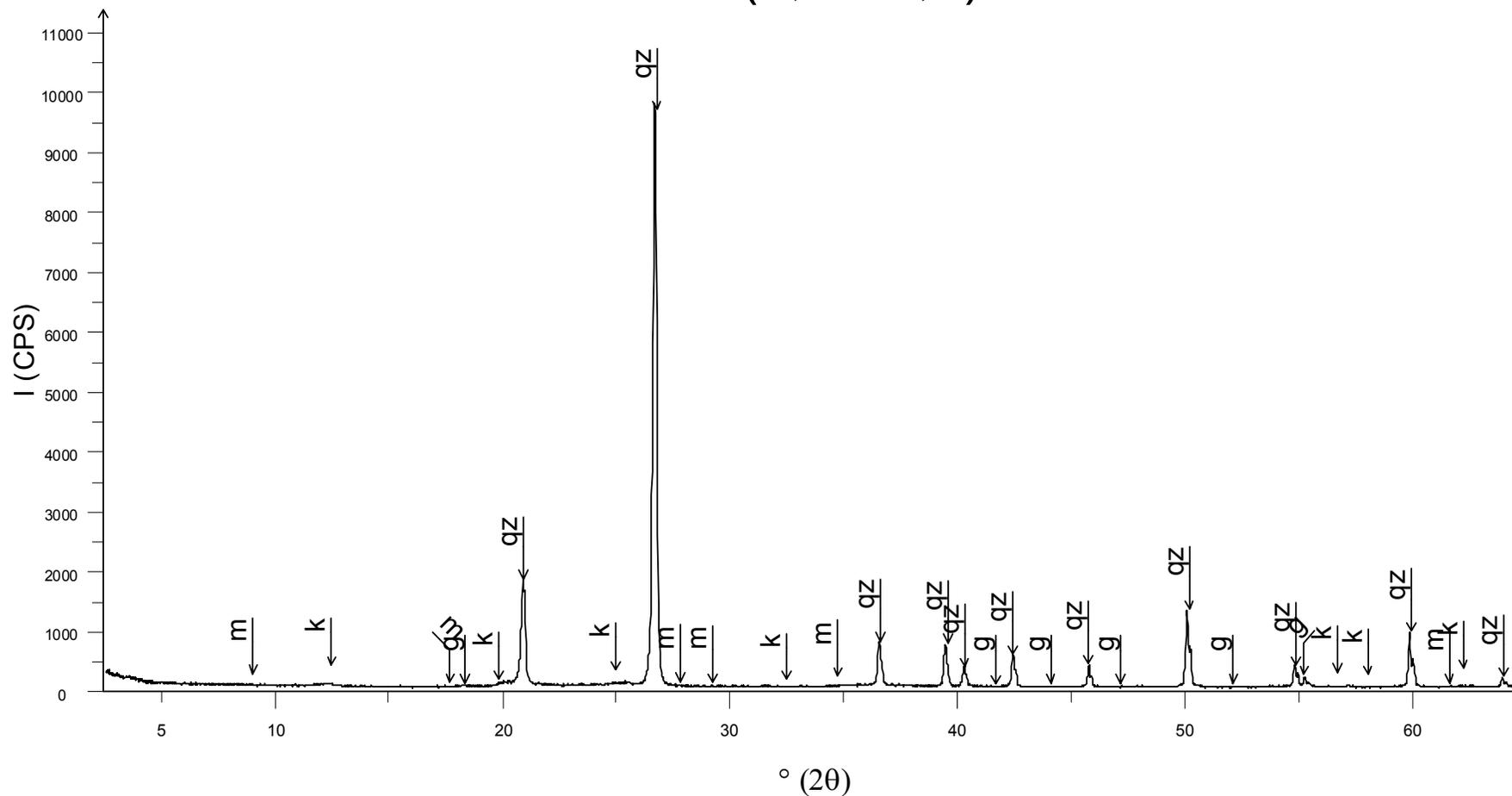
⚠ Sed N (3,0 - 3,5) - File: 106-0725.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.50 ° - End: 70.00 ° - Step: 0.02 ° - Step time: 1. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 2.50 ° - Theta: 1.25 ° -

# S Sub N (3,5 - 3,8)



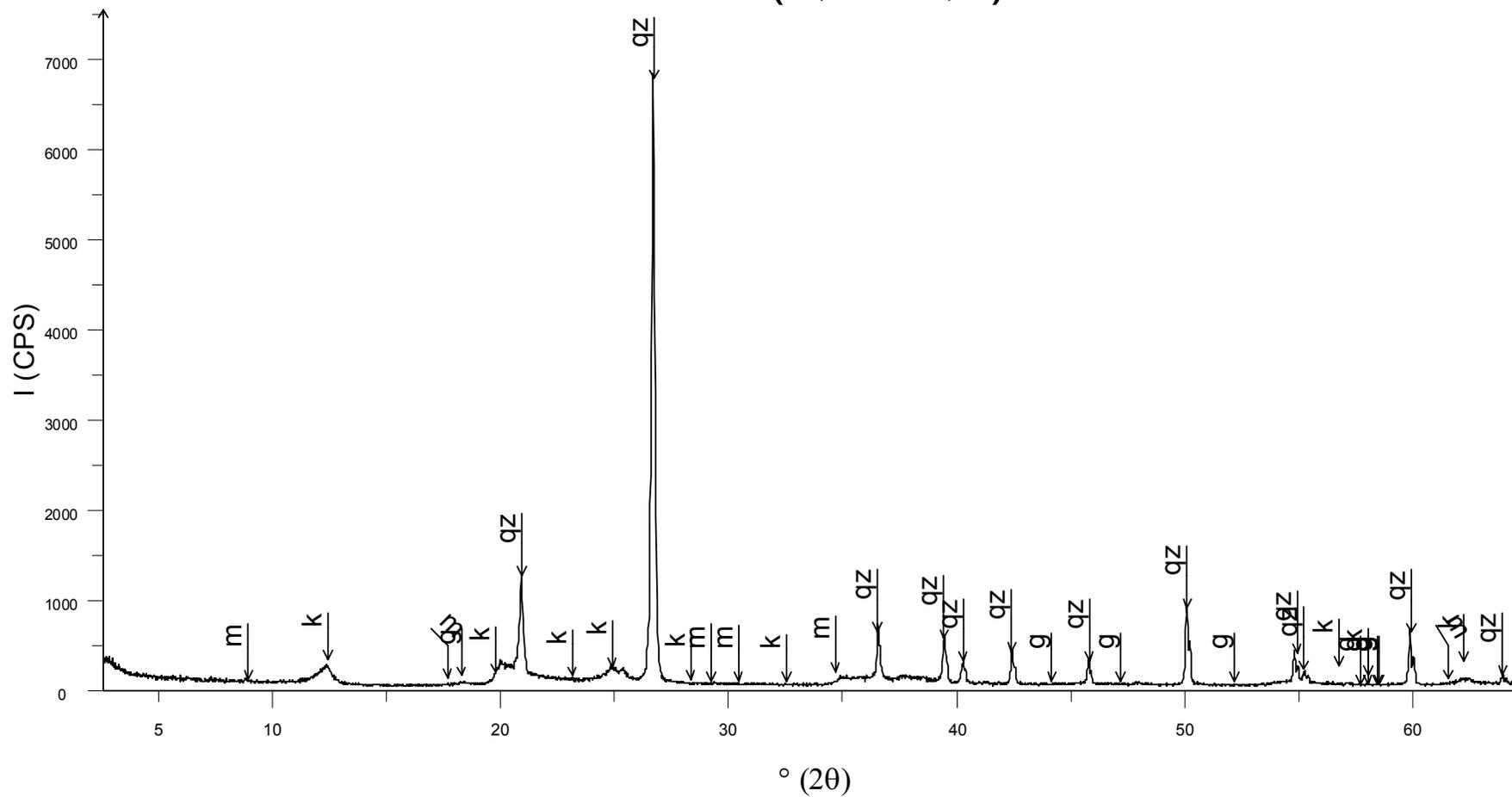
MS Sub N (3,5 - 3,8) - File: 106-0727.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.50 ° - End: 70.00 ° - Step: 0.02 ° - Step time: 1. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 2.50 ° - Theta: 1.25

# Sed W (2,3 - 2,5)



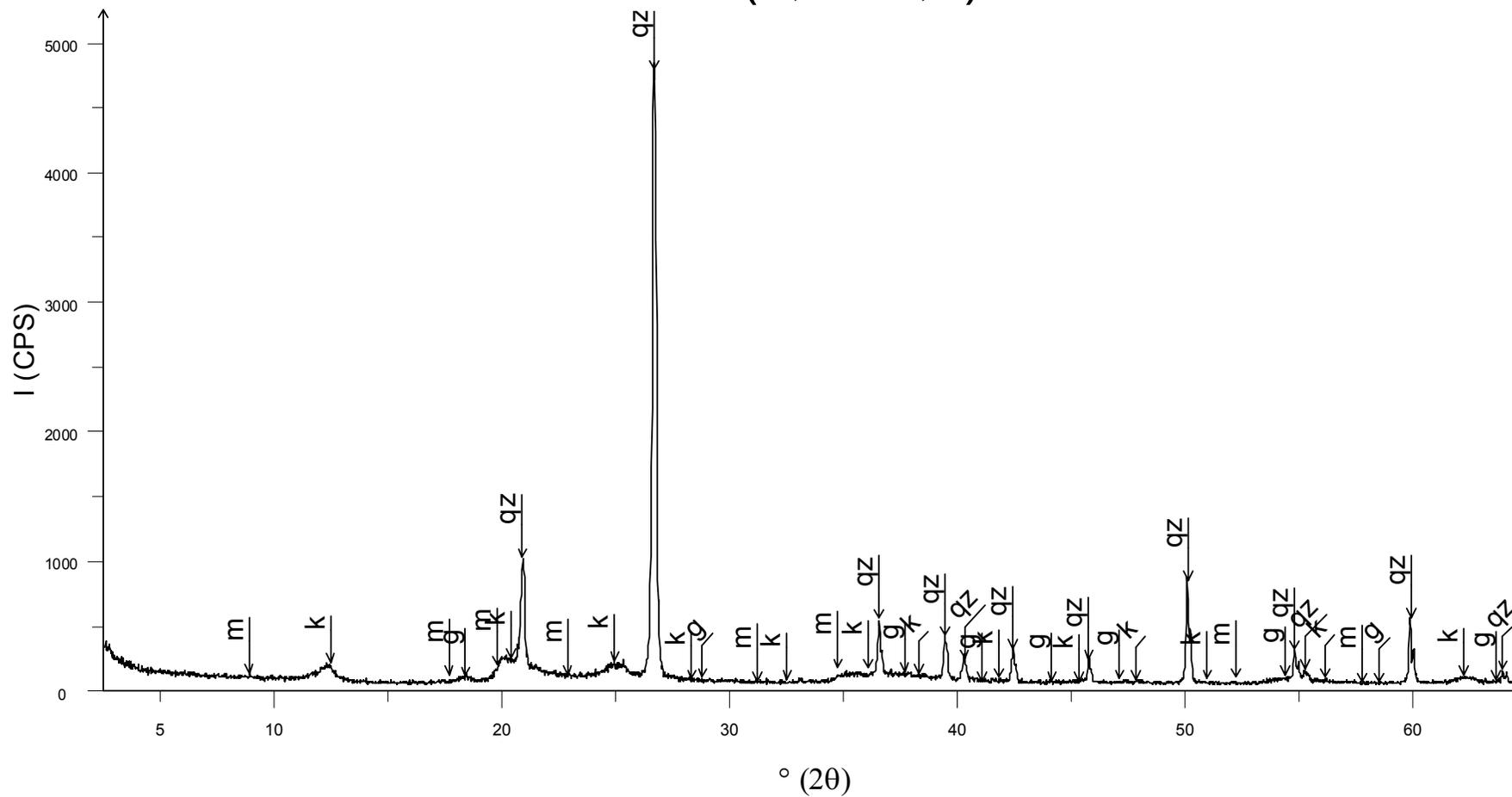
⚠ Sed W (2,3-2,5) - File: 106-0715.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.50 ° - End: 70.00 ° - Step: 0.02 ° - Step time: 1. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 2.50 ° - Theta: 1.25 ° -

# S Sub W (2,5 - 2,9)



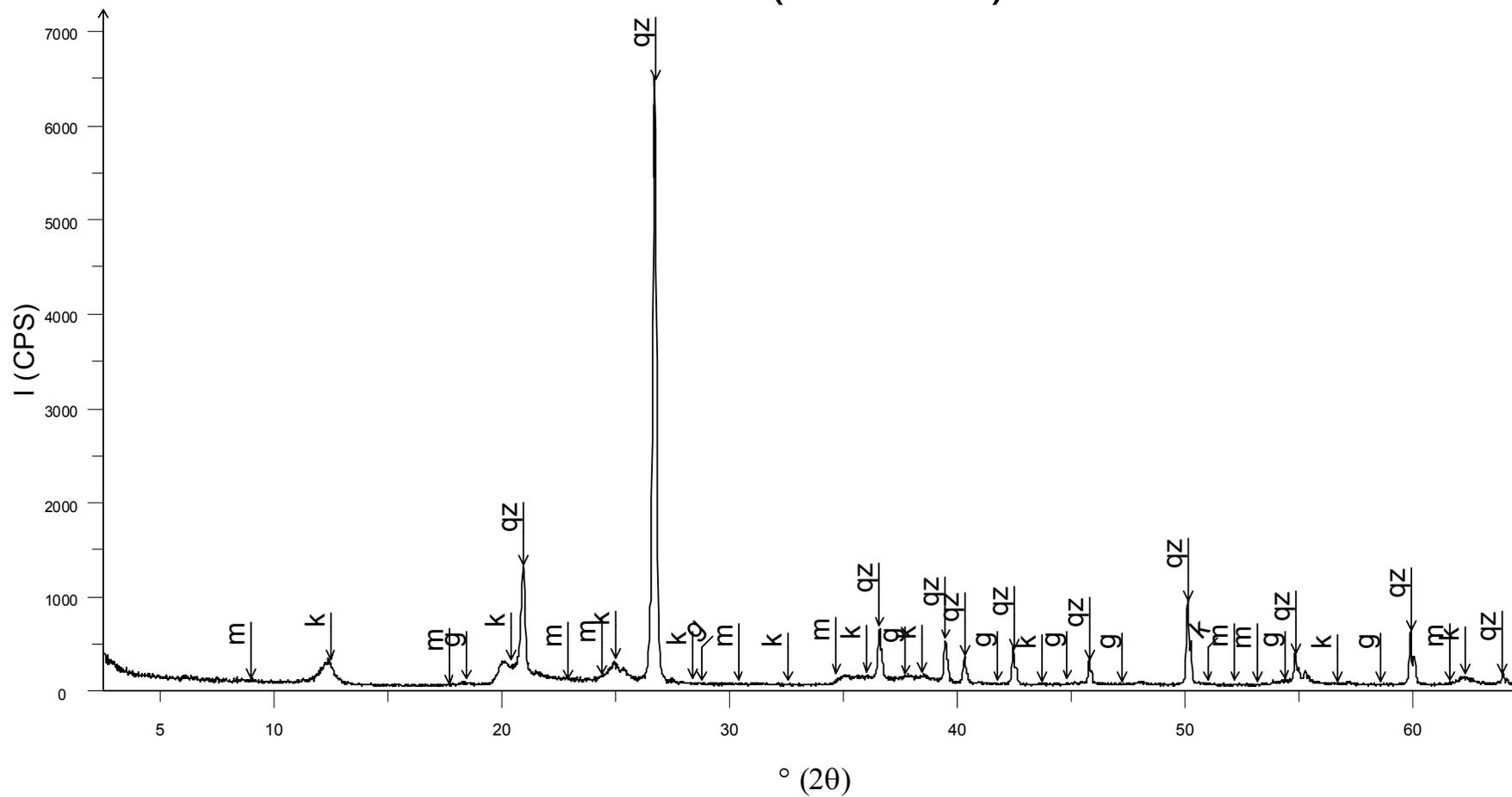
⚠ S Sub W (2,5-2,9) - File: 106-0714.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.50 ° - End: 70.00 ° - Step: 0.02 ° - Step time: 1. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 2.50 ° - Theta: 1.25

# Sed W (1,4 - 1,7)



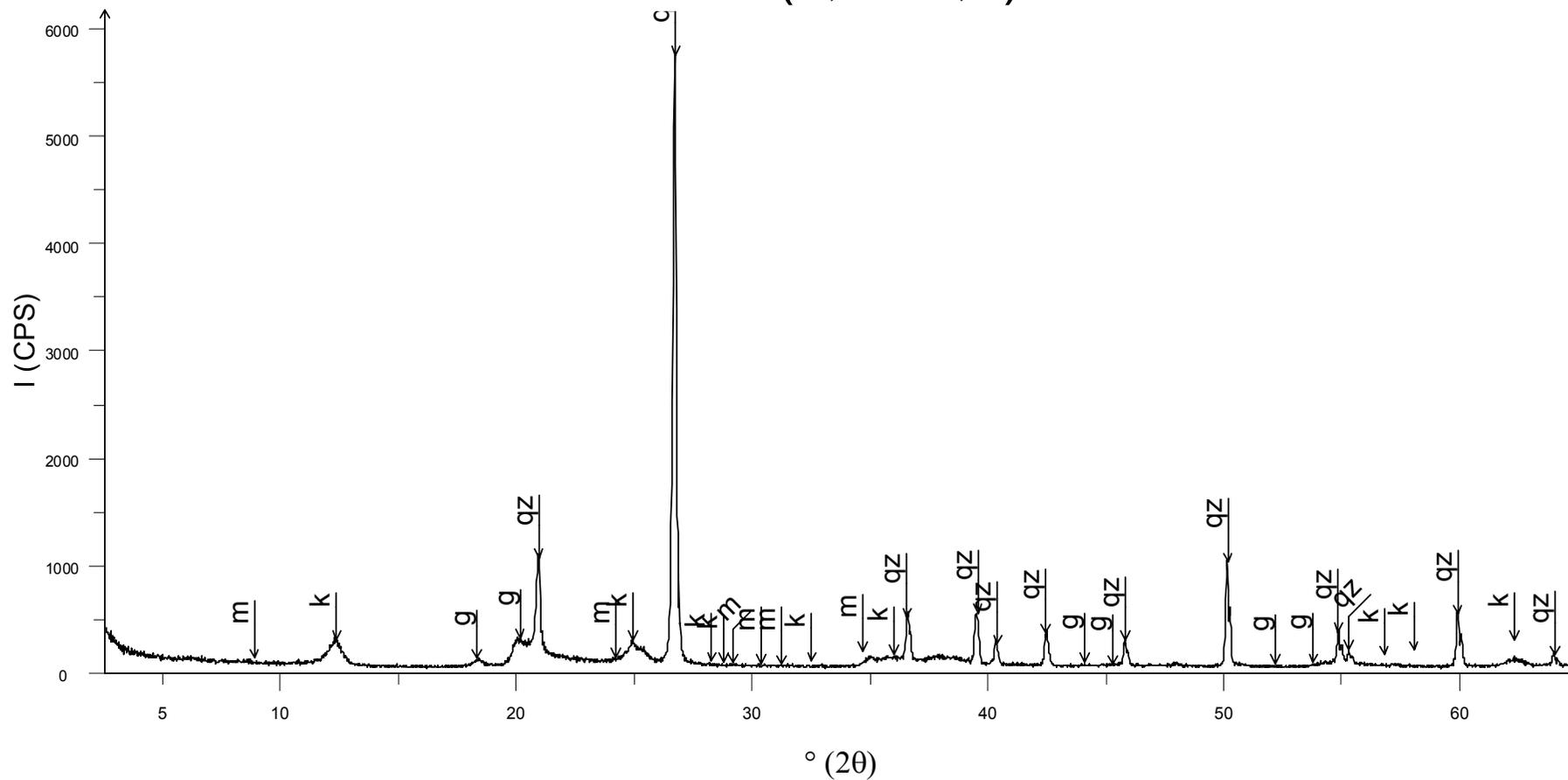
⚡ Sed W (1,4-1,7) - File: 106-0717.raw - Type: 2Th/Th locked - Start:  $2.50^\circ$  - End:  $70.00^\circ$  - Step:  $0.02^\circ$  - Step time: 1. s - Temp.:  $25^\circ\text{C}$  (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta:  $2.50^\circ$  - Theta:  $1.25^\circ$  -

# S Sub W (1.7 - 2.1)



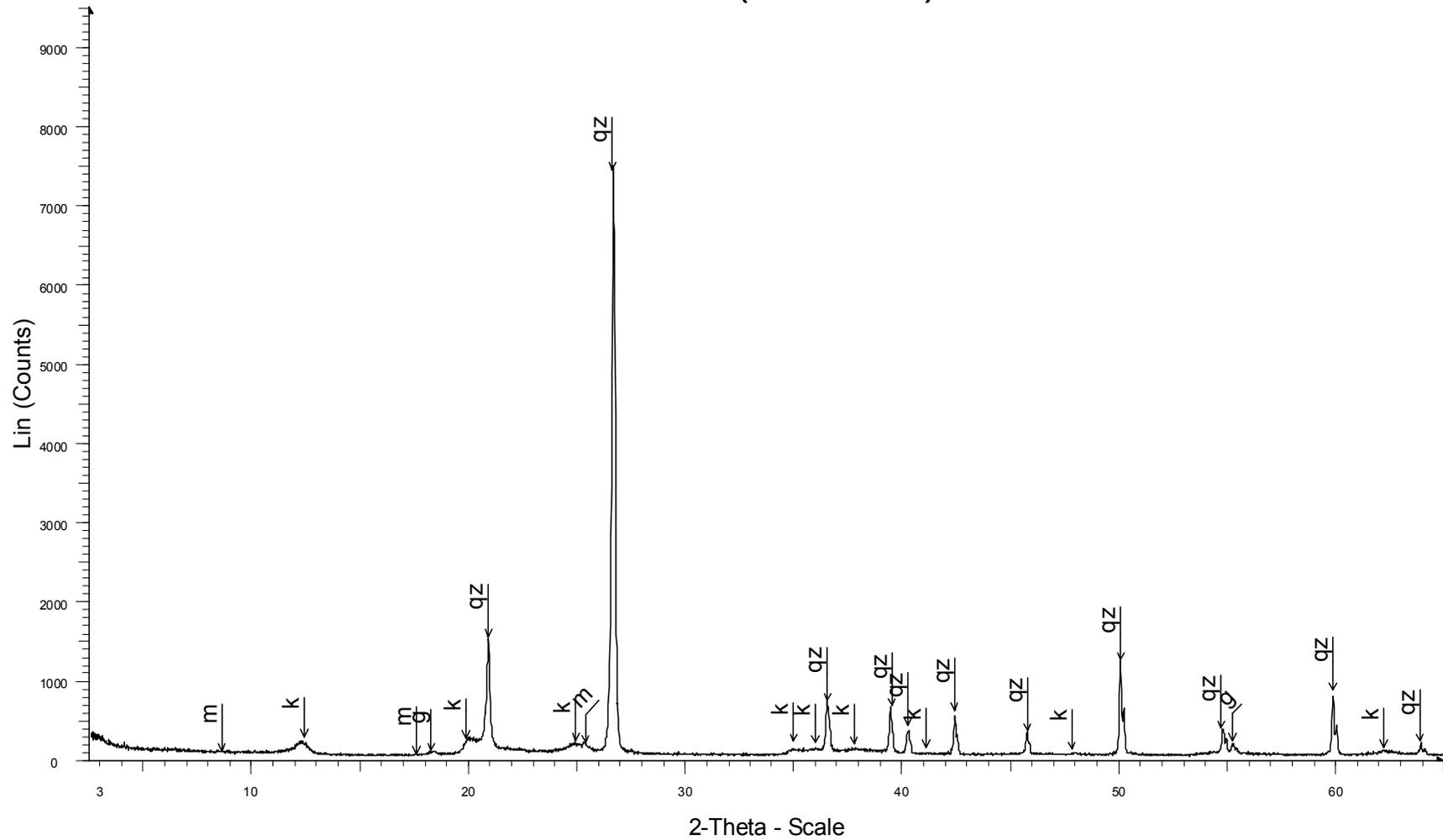
S Sub W (1,7-2,1) - File: 106-0716.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.50° - End: 70.00° - Step: 0.02° - Step time: 1. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 2.50° - Theta: 1.25

# Sed SE (1,8 - 2,1)



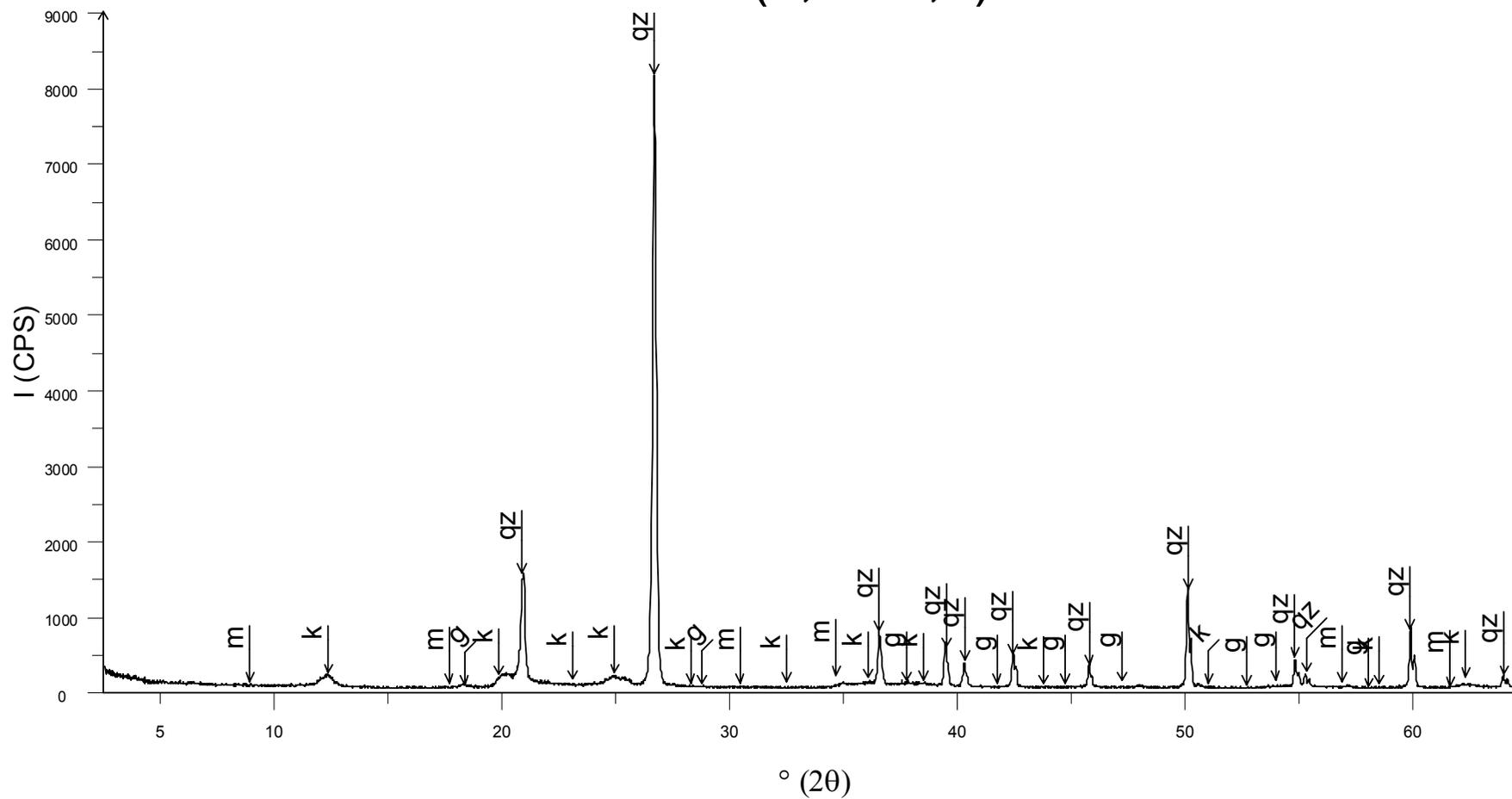
⏏ Sed SE (1,8 - 2,1) - File: 106-0719.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.50 ° - End: 70.00 ° - Step: 0.02 ° - Step time: 1. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 2.50 ° - Theta: 1.25 ° - C

# S Sub SE (2,1 - 2,4)



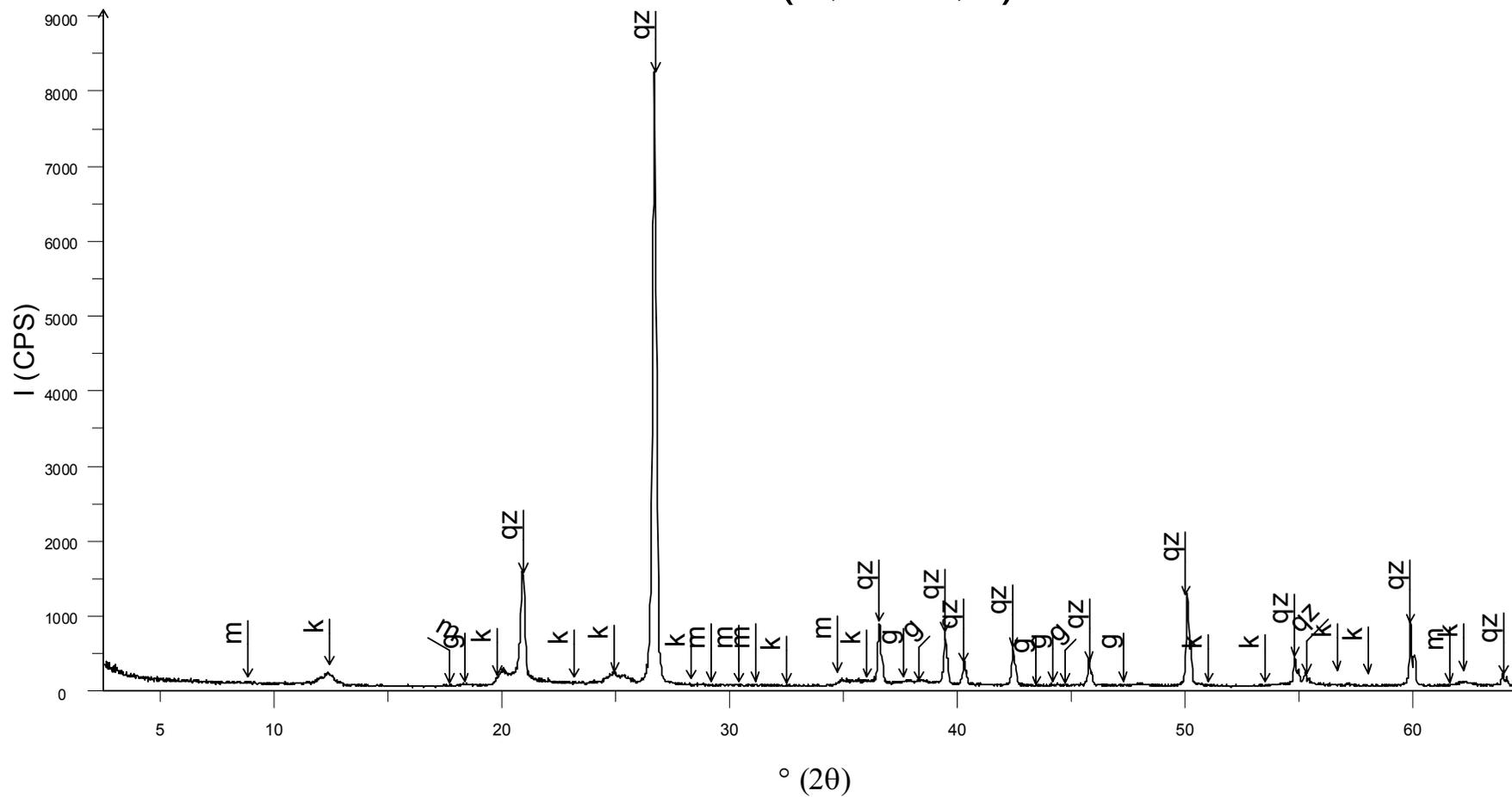
S Sub SE (2,1 - 2,4) - File: 106-0718.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.50 ° - End: 70.00 ° - Step: 0.02 ° - Step time: 1. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 2.50 ° - Theta: 1.25 ° - Chi: 0.00 ° - Phi: 0.0  
Operations: Import

# Sed SE (1,2 - 1,5)



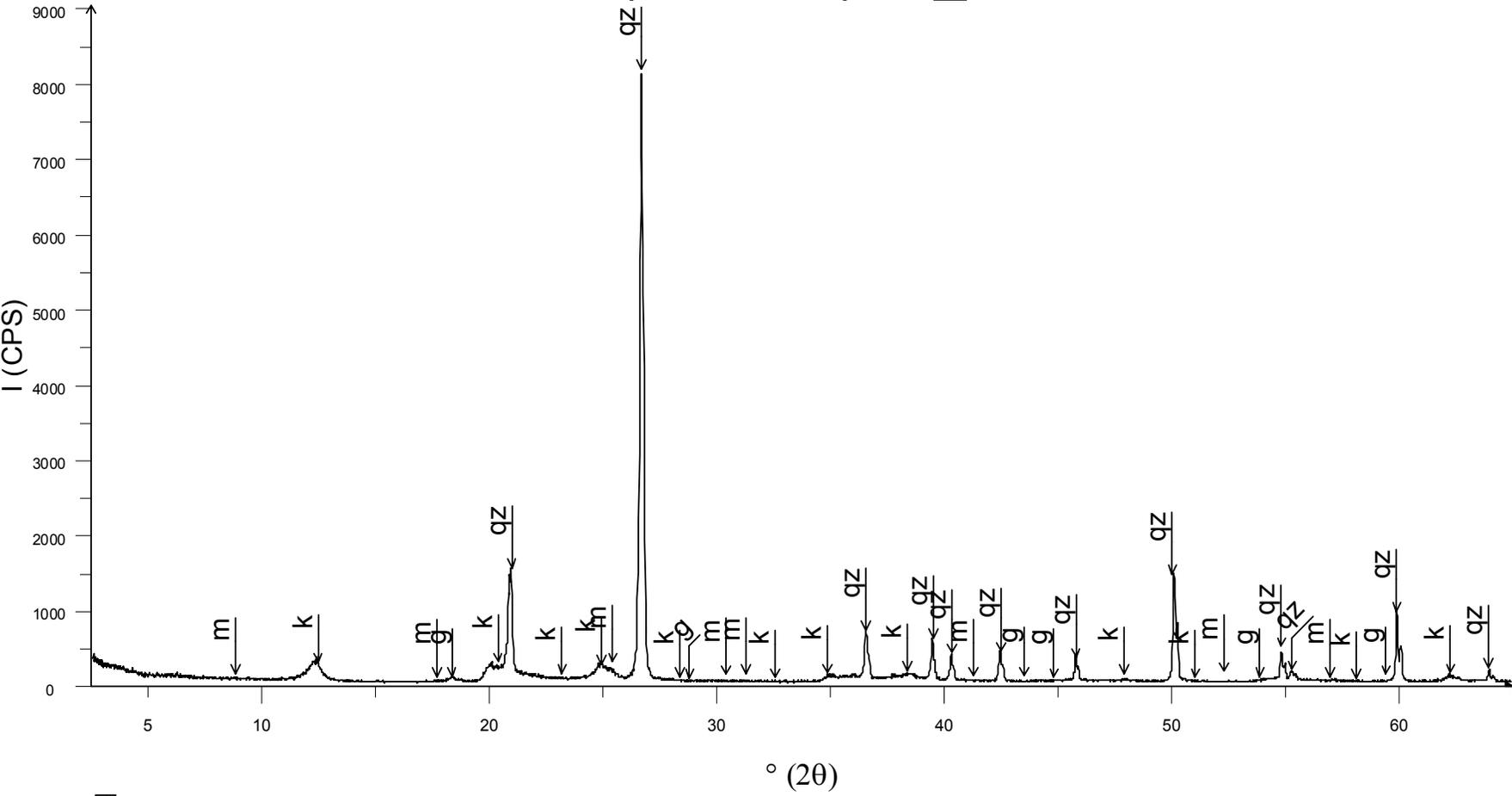
⚠ Sed SE (1,2 - 1,5) - File: 106-0723.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.50 ° - End: 70.00 ° - Step: 0.02 ° - Step time: 1. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 2.50 ° - Theta: 1.25 °

# S Sub SE (1,5 - 1,9)



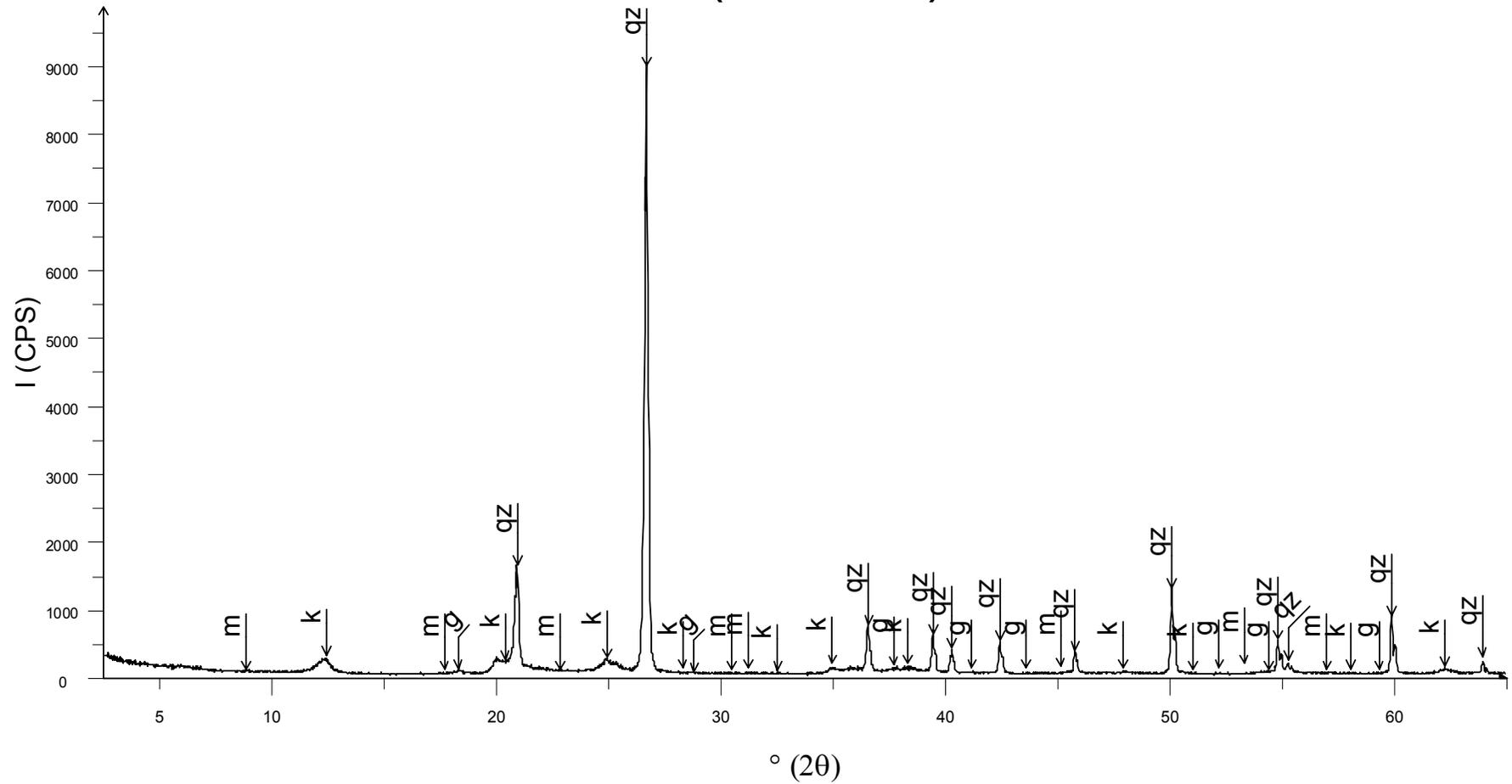
MS Sub SE (1,5 - 1,9) - File: 106-0720.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.50 ° - End: 70.00 ° - Step: 0.02 ° - Step time: 1. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 2.50 ° - Theta: 1.2

# S-45 (1,7 - 1,9) 04\_05



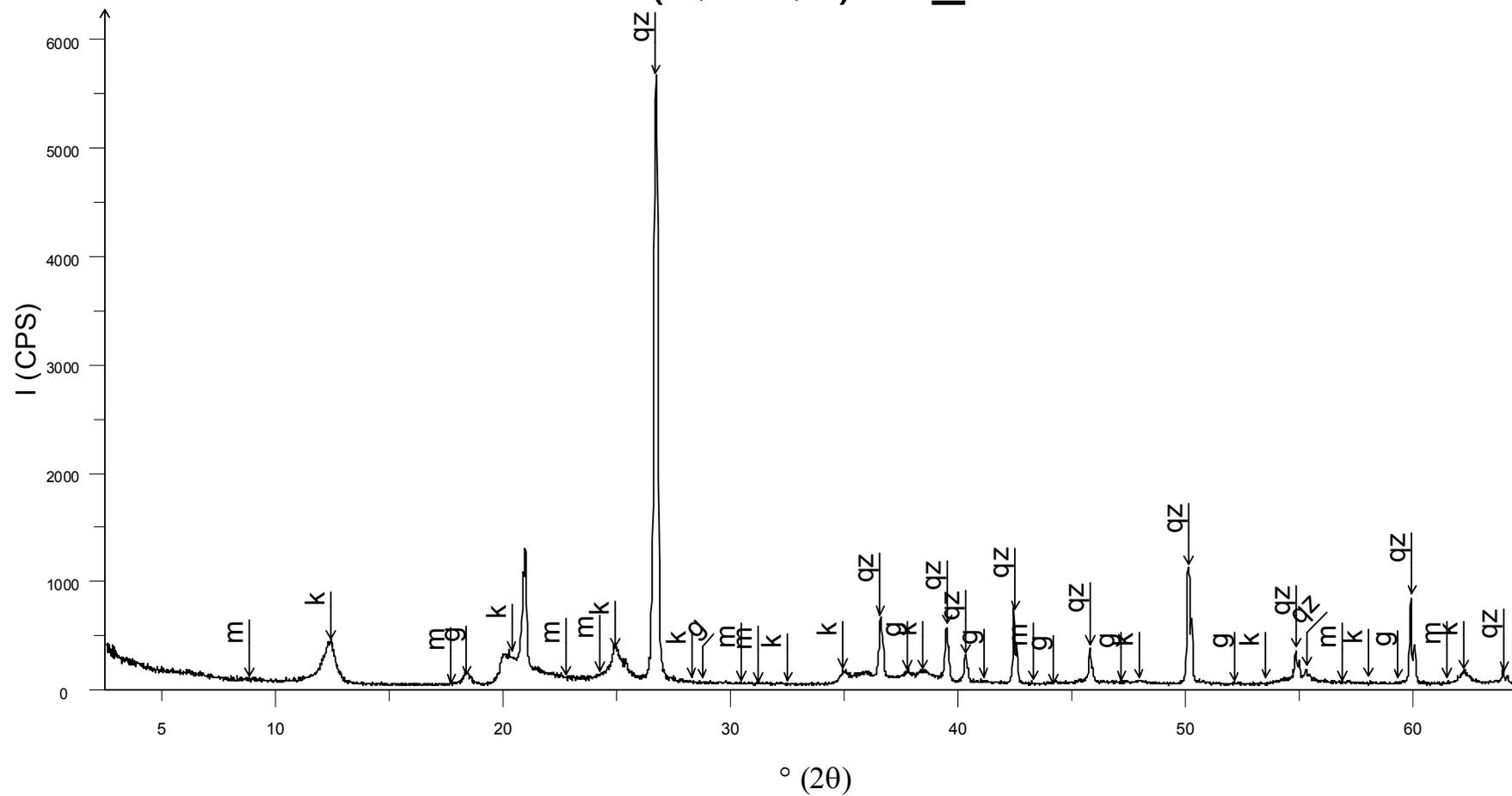
S-45 (1,7-1,9) 04/05 - File: 106-0730.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.50 ° - End: 70.00 ° - Step: 0.02 ° - Step time: 1. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 2.50 ° - Theta: 1.2

# S-45 (1,7 - 1,8)



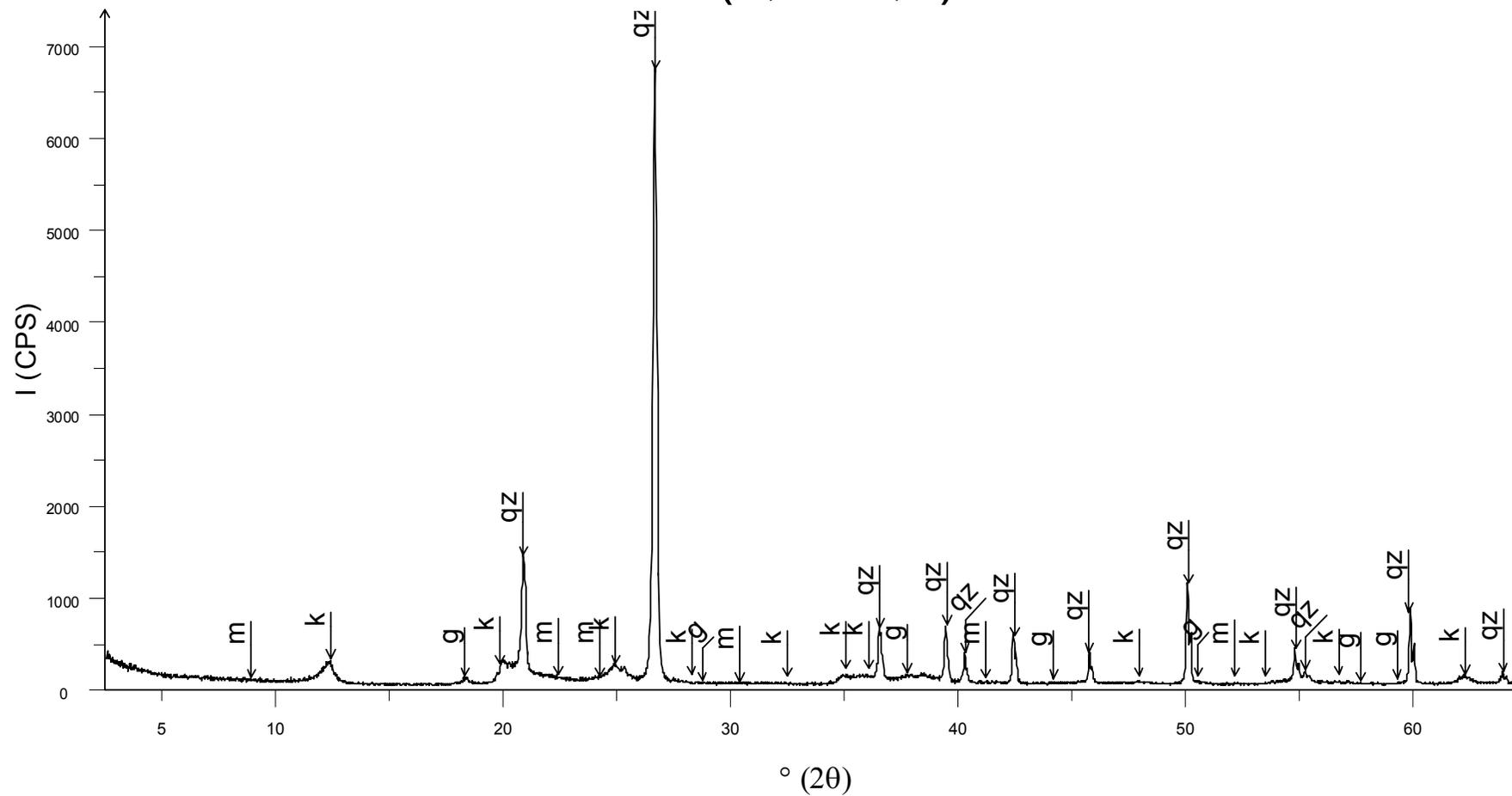
S-45 (1,7-1,6) 10/05 - File: 106-0731.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.50 ° - End: 70.00 ° - Step: 0.02 ° - Step time: 1. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 2.50 ° - Theta: 1.2

# S-46 (1,8-2,2) 04\_05



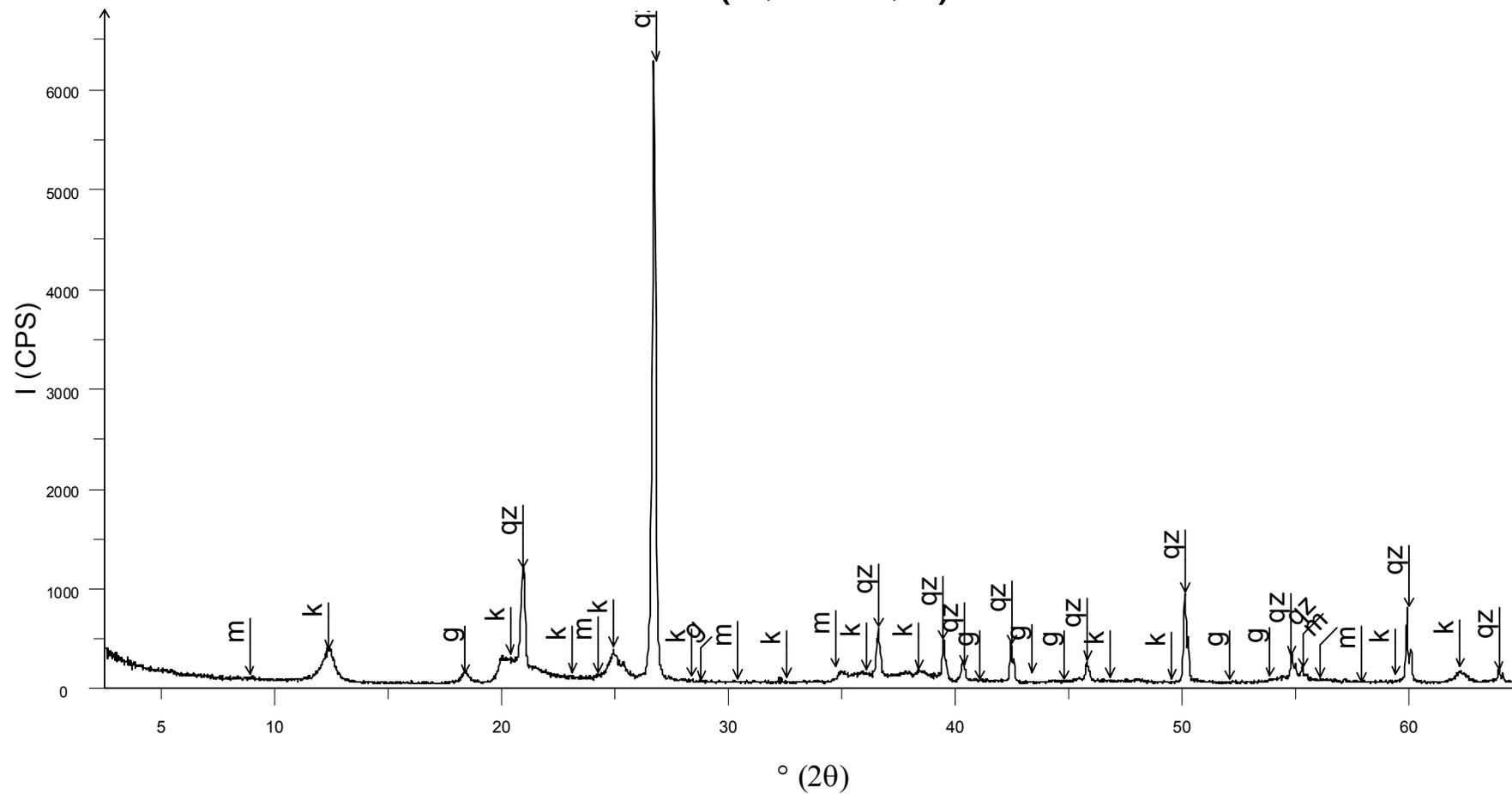
S-46 (1,8-2,2) 04/05 - File: 106-0729.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.50 ° - End: 70.00 ° - Step: 0.02 ° - Step time: 1. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 2.50 ° - Theta: 1.2

# S-46 (1,8 - 2,2)



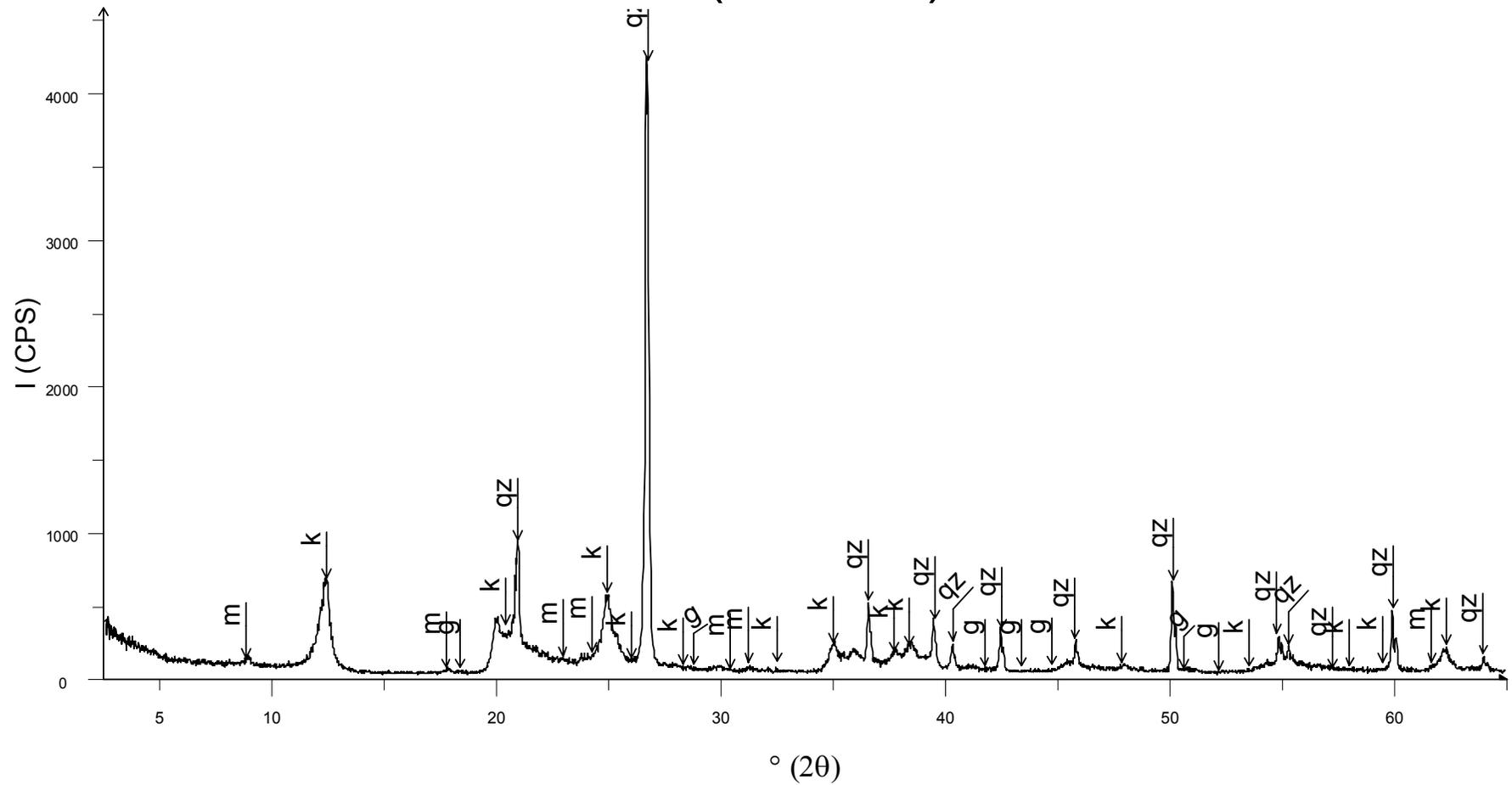
S-46 (1,8-2,2) 10/05 - File: 106-0728.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.50 ° - End: 70.00 ° - Step: 0.02 ° - Step time: 1. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 2.50 ° - Theta: 1.2

# S-47 (1,1 - 1,5)



S-47 (1,1 - 1,5) - File: 106-0726.raw - Type: 2Th/Th locked - Start:  $2.50^\circ$  - End:  $70.00^\circ$  - Step:  $0.02^\circ$  - Step time: 1. s - Temp.:  $25^\circ\text{C}$  (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta:  $2.50^\circ$  - Theta:  $1.25^\circ$  -

# S-47 (3,4 - 3,5)



S-47 (3,4 - 3,5) - File: 106-0724.raw - Type: 2Th/Th Locked - Start: 2.50° - End: 70.00° - Step: 0.02° - Step time: 1. s - Temp.: 25°C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 2.50° - Theta: 1.25° - C

**ANEXO VIII**  
**RESULTADOS pH, MO, CTC**

# LAGRO

LABORATORIO AGRONOMICO S/C LTDA  
 Av. Francisco Jose de Camargo Andrade, 824  
 Fones 3241-8815 e 3241-5044 (0 19)  
 CEP 13.070-551 - Campinas - SP

Nome: ASA Assessoria e Serviços Ambientais  
 Propriedade:  
 Endereço:  
 Município: Sao Paulo - SP  
 Data: 06/04/2006 Controle: 77282.1/ 0

## Resultados de Análises de Terra

\* Sistema normal \*

Amostra	Cultura	pH		%	P (ppm)			mEq / 100 ml TFSA						
		CaCl2	agua		M.O.	*	**	K *	Ca	Mg	Al	H	CTC	V%
LAGRO N.Inter.														
300833	04/05 S45 (1.7/1.9)	6.5	7.4	1.5		3.1	0.31	4.7	0.7	0.1	0.8	6.6	86.4	
300834	10/05 S45 (1.7/1.9)	6.5	7.3	2.0		4.4	0.32	4.5	1.0	0.1	0.8	6.7	86.6	
300835	04/05 S46 (1.8/2.2)	4.5	6.3	0.9		2.2	0.20	0.9	0.4	0.5	4.2	6.2	24.2	
300836	10/05 S46 (1.8/2.2)	4.5	6.0	0.9		2.2	0.18	0.8	0.3	0.5	5.3	7.1	18.1	
300837	S47 (1.1/1.5)	5.1	6.5	0.7		2.2	0.19	1.6	0.3	0.1	2.4	4.6	45.5	

\* Sistema internacional \*

Amostra	Cultura	pH		g/dm3	P (mg/dm3)			mmolc/dm3					
		CaCl2	agua		M.O.	*	**	K *	Ca	Mg	Al	H	CTC
LAGRO N.Inter.													
300833	04/05 S45 (1.7/1.9)	6.5	7.4	15.0		3.1	3.12	47.0	7.0	1.0	8.0	66.1	86.4
300834	10/05 S45 (1.7/1.9)	6.5	7.3	20.0		4.4	3.23	45.0	10.0	1.0	8.0	67.2	86.6
300835	04/05 S46 (1.8/2.2)	4.5	6.3	9.0		2.2	2.00	9.0	4.0	5.0	42.0	62.0	24.2
300836	10/05 S46 (1.8/2.2)	4.5	6.0	9.0		2.2	1.82	8.0	3.0	5.0	53.0	70.8	18.1
300837	S47 (1.1/1.5)	5.1	6.5	7.0		2.2	1.87	16.0	3.0	1.0	24.0	45.9	45.5

Amostra	Cultura	ppm		Micronutrientes (ppm)				
		S	Na	Fe	Mn	Cu	Zn	B
LAGRO N.Inter.								
300833	04/05 S45 (1.7/1.9)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7
300834	10/05 S45 (1.7/1.9)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7
300835	04/05 S46 (1.8/2.2)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5
300836	10/05 S46 (1.8/2.2)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4
300837	S47 (1.1/1.5)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4

Observacoes: Extratores: \* - Melich  
 \*\* - Resina anionica

Fernando Jose Hass  
 Engenheiro Agronomo, Dr, Ms  
 CREA n. 31.098 - SP

LABORATORIO AGRONOMICO S/C LTDA  
 Av. Francisco Jose de Camargo Andrade, 824  
 Fones 3241-8815 e 3241-5044 (0 19)  
 CEP 13.070-551 - Campinas - SP

Nome: ASA Assessoria e Serviços Ambientais  
 Propriedade:  
 Endereço:  
 Município: Sao Paulo - SP  
 Data: 06/04/2006 Controle: 77282.2/ 0

**Resultados de Análises de Terra**

\* Sistema normal \* -----

Amostra	Cultura	pH		%	P (ppm)			mEq / 100 ml TFSA				
		CaCl2	agua		M.O.	*	**	K *	Ca	Mg	Al	H
300838	S47 (3.4/3.5)	4.6	6.5	2.6	3.3	0.46	2.4	0.6	0.1	5.1	8.7	39.9
300839	Sed SE (1.2/1.5)	5.1	5.9	0.9	5.3	0.57	5.6	1.3	0.1	2.1	9.7	77.2
300840	S Sub SE (1.5/1.9)	5.8	6.8	2.7	2.9	0.35	1.7	0.8	0.1	1.2	4.2	68.7
300841	Sed SE (1.8/2.1)	5.5	6.0	2.0	8.9	0.73	6.9	1.0	0.1	1.4	10.1	85.2
300842	S Sub SE (2.1/2.4)	5.6	6.2	4.5	6.2	0.72	4.5	1.2	0.1	1.4	7.9	81.1

\* Sistema internacional \* -----

Amostra	Cultura	pH		g/dm3	P (mg/dm3)			mmolc/dm3				
		CaCl2	agua		M.O.	*	**	K *	Ca	Mg	Al	H
300838	S47 (3.4/3.5)	4.6	6.5	26.0	3.3	4.56	24.0	6.0	1.0	51.0	86.6	39.9
300839	Sed SE (1.2/1.5)	5.1	5.9	9.0	5.3	5.68	56.0	13.0	1.0	21.0	96.7	77.2
300840	S Sub SE (1.5/1.9)	5.8	6.8	27.0	2.9	3.53	17.0	8.0	1.0	12.0	41.5	68.7
300841	Sed SE (1.8/2.1)	5.5	6.0	20.0	8.9	7.27	69.0	10.0	1.0	14.0	101.3	85.2
300842	S Sub SE (2.1/2.4)	5.6	6.2	45.0	6.2	7.22	45.0	12.0	1.0	14.0	79.2	81.1

Amostra	Cultura	ppm		Micronutrientes (ppm)				
		S	Na	Fe	Mn	Cu	Zn	B
300838	S47 (3.4/3.5)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9
300839	Sed SE (1.2/1.5)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6
300840	S Sub SE (1.5/1.9)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6
300841	Sed SE (1.8/2.1)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7
300842	S Sub SE (2.1/2.4)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5

Observacoes: Extratores: \* - Melich  
 \*\* - Resina anionica

Fernando Jose Hass  
 Engenheiro Agronomo, Dr, Ms  
 CREA n. 31.098 - SP

LABORATORIO AGRONOMICO S/C LTDA  
 Av. Francisco Jose de Camargo Andrade, 824  
 Fones 3241-8815 e 3241-5044 (0 19)  
 CEP 13.070-551 - Campinas - SP

Nome: ASA Assessoria e Serviços Ambientais  
 Propriedade:  
 Endereço:  
 Município: Sao Paulo - SP  
 Data: 06/04/2006 Controle: 77282.3/ 0

### Resultados de Análises de Terra

\* Sistema normal \*

Amostra	Cultura	pH		%	P (ppm)			mEq / 100 ml TFSA				
		CaCl2	agua		M.O.	*	**	K *	Ca	Mg	Al	H
300843	Sed W (1.4/1.7)	5.5	5.9	0.6	29.3	0.60	7.3	1.7	0.1	1.1	10.8	88.9
300844	S Sub W (1.7/2.1)	4.5	6.5	2.7	3.1	0.20	1.4	0.4	0.1	5.7	7.8	25.7
300845	Sed W (2.3/2.5)	5.0	5.5	1.2	19.8	0.29	5.6	1.1	0.8	1.7	9.5	73.7
300846	S Sub W (2.5/2.9)	5.0	5.5	7.2	7.3	0.36	2.3	0.8	0.1	1.7	5.3	65.8

\* Sistema internacional \*

Amostra	Cultura	pH		g/dm3	P (mg/dm3)			mmolc/dm3				
		CaCl2	agua		M.O.	*	**	K *	Ca	Mg	Al	H
300843	Sed W (1.4/1.7)	5.5	5.9	6.0	29.3	5.99	73.0	17.0	1.0	11.0	108.0	88.9
300844	S Sub W (1.7/2.1)	4.5	6.5	27.0	3.1	2.02	14.0	4.0	1.0	57.0	78.0	25.7
300845	Sed W (2.3/2.5)	5.0	5.5	12.0	19.8	2.89	56.0	11.0	8.0	17.0	94.9	73.7
300846	S Sub W (2.5/2.9)	5.0	5.5	72.0	7.3	3.56	23.0	8.0	1.0	17.0	52.6	65.8

Amostra	Composicao Granulometrica ( % )				Densidades		Porosi- dade %	Classe	Sub-classe
	--- Areias ---		---		---	---			
LAGRO N.Inter.	Grossa	Fina	Limo	Argila	Cascalho	Aparente	Real		
300846	29.0	15.0	27.0	29.0	0.0	1.11	2.30	51.59	Barrentos Barrento

Amostra	Cultura	ppm		Micronutrientes (ppm)				
		S	Na	Fe	Mn	Cu	Zn	B
300843	Sed W (1.4/1.7)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
300844	S Sub W (1.7/2.1)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6
300845	Sed W (2.3/2.5)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6
300846	S Sub W (2.5/2.9)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8

Observacoes: Extratores: \* - Melich  
 \*\* - Resina anionica

Fernando Jose Hass  
 Engenheiro Agronomo, Dr, Ms  
 CREA n. 31.098 - SP

LABORATORIO AGRONOMICO S/C LTDA  
 Av. Francisco Jose de Camargo Andrade, 824  
 Fones 3241-8815 e 3241-5044 (0 19)  
 CEP 13.070-551 - Campinas - SP

Nome: ASA Assessoria e Serviços Ambientais  
 Propriedade:  
 Endereço:  
 Município: Sao Paulo - SP  
 Data: 06/04/2006 Controle: 77282.4/ 0

### Resultados de Análises de Terra

\* Sistema normal \* -----

Amostra	LAGRO N.Inter.	Cultura	pH		%	P (ppm)			mEq / 100 ml TFSA				
			CaCl2	agua		M.O.	*	**	K *	Ca	Mg	Al	H
	300847	Sed N (3.0/3.5)	5.3	5.9	1.2	42.3	0.51	9.0	1.3	0.1	3.0	13.9	77.7
	300848	S Sub N(3.5/3.8)	5.5	6.5	3.4	15.5	0.34	2.3	0.6	0.1	1.4	4.7	68.4
	300849	Sed N (3.5/3.9)	4.3	4.8	7.4	63.3	0.41	4.5	1.5	0.8	5.6	12.8	50.1
	300850	S Sub N(3.9/4.1)	5.0	5.5	1.1	38.4	0.30	10.3	2.0	0.1	3.3	16.0	78.8

\* Sistema internacional \* -----

Amostra	LAGRO N.Inter.	Cultura	pH		g/dm3	P (mg/dm3)			mmolc/dm3				
			CaCl2	agua		M.O.	*	**	K *	Ca	Mg	Al	H
	300847	Sed N (3.0/3.5)	5.3	5.9	12.0	42.3	5.12	90.0	13.0	1.0	30.0	139.1	77.7
	300848	S Sub N(3.5/3.8)	5.5	6.5	34.0	15.5	3.43	23.0	6.0	1.0	14.0	47.4	68.4
	300849	Sed N (3.5/3.9)	4.3	4.8	74.0	63.3	4.15	45.0	15.0	8.0	56.0	128.1	50.1
	300850	S Sub N(3.9/4.1)	5.0	5.5	11.0	38.4	3.05	103.0	20.0	1.0	33.0	160.0	78.8

Amostra	LAGRO N.Inter.	Cultura	ppm		Micronutrientes (ppm)				
			S	Na	Fe	Mn	Cu	Zn	B
	300847	Sed N (3.0/3.5)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
	300848	S Sub N(3.5/3.8)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5
	300849	Sed N (3.5/3.9)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8
	300850	S Sub N(3.9/4.1)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2

Observacoes: Extratores: \* - Melich  
 \*\* - Resina anionica

Fernando Jose Hass  
 Engenheiro Agronomo, Dr, Ms  
 CREA n. 31.098 - SP

**ANEXO IX**  
**CÁLCULO DOS PERCENTUAIS DE ERROS OBTIDOS**  
**COM O BALANÇO IÔNICO**

Erros obtidos pelo balanço iônico dos resultados das análises totais dos poços - Março/2005.

LABORATÓRIO																						
	PM-01		PM-01P		PM-03		PM-05		PM-06		PM-08		PM-09		PM-10		PM-10P		PM-11		PM-12	
Parâmetros	(mg/L)	(meq/L)	(mg/L)	(meq/L)	(mg/L)	(meq/L)	(mg/L)	(meq/L)	(mg/L)	(meq/L)	(mg/L)	(meq/L)	(mg/L)	(meq/L)	(mg/L)	(meq/L)	(mg/L)	(meq/L)	(mg/L)	(meq/L)	(mg/L)	(meq/L)
<b>Ânions</b>																						
Alcalinidade	13.16	0.22	58.63	0.96	210.60	3.45	105.89	1.74	78.14	1.28	25.73	0.42	20.58	0.34	191.58	3.14	125.29	2.05	228.56	3.75	14.09	0.23
Cloreto	27.88	0.79	32.22	0.91	52.09	1.47	33.08	0.93	20.07	0.57	9.29	0.26	3.11	0.09	22.99	0.65	50.43	1.42	29.21	0.82	70.53	1.99
Nitrato	3.56	0.06	0.08	0.00	0.17	0.00	19.06	0.31	0.07	0.00	1.47	0.02	0.12	0.00	0.08	0.00	0.04	0.00	0.06	0.00	9.69	0.16
Sulfato	6.24	0.13	1.44	0.03	13.22	0.28	61.16	1.27	12.04	0.25	3.92	0.08	5.99	0.12	42.15	0.88	22.60	0.47	12.18	0.25	1.73	0.04
<b>SOMA</b>		<b>1.19</b>		<b>1.90</b>		<b>5.20</b>		<b>4.25</b>		<b>2.10</b>		<b>0.79</b>		<b>0.55</b>		<b>4.67</b>		<b>3.95</b>		<b>4.82</b>		<b>2.41</b>
<b>Cátions</b>																						
Cálcio	0.80	0.04	13.00	0.65	4.20	0.21	0.90	0.05	2.90	0.15	0.40	0.02	1.30	0.07	2.20	0.11	4.10	0.21	2.00	0.10	1.00	0.05
Ferrol	0.280	0.010	0.52	0.02	<0,1	<0,003	0.48	0.02	1.04	0.04	<0,05	<0,002	<0,05	<0,002	1.26	0.05	0.43	0.02	0.70	0.03	<0,1	<0,003
Magnésio	0.40	0.03	2.40	0.20	0.50	0.04	0.30	0.03	0.50	0.04	<0,1	<0,01	0.20	0.02	0.50	0.04	0.80	0.07	0.60	0.05	0.20	0.02
Potássio	1.10	0.03	2.20	0.06	3.20	0.08	4.10	0.11	2.10	0.05	<0,5	<0,01	0.90	0.02	5.80	0.15	0.80	0.02	6.10	0.16	1.90	0.05
Sódio	32.00	1.39	19.00	0.83	107.00	4.65	98.00	4.26	37.00	1.61	4.30	0.19	11.00	0.48	106.00	4.61	93.00	4.04	84.00	3.65	53.00	2.30
<b>SOMA</b>		<b>1.50</b>		<b>1.75</b>		<b>4.99</b>		<b>4.45</b>		<b>1.85</b>		<b>0.21</b>		<b>0.58</b>		<b>4.95</b>		<b>4.35</b>		<b>3.98</b>		<b>2.42</b>
Erro (%)		<b>11.68</b>		-4.08		-2.08		2.34		-6.31		<b>-58.44</b>		2.76		2.98		4.88		-9.55		0.20

1,1 - Valores superiores ao erro máximo permitido (>10%).

LABORATÓRIO																						
	PM-58		PM-13		PM-14		PM-15		PM-18		PM-19		PM-20		PP-02		PP-03		PP-06		LAGO N	
Parâmetros	(mg/L)	(meq/L)	(mg/L)	(meq/L)	(mg/L)	(meq/L)	(mg/L)	(meq/L)	(mg/L)	(meq/L)	(mg/L)	(meq/L)	(mg/L)	(meq/L)	(mg/L)	(meq/L)	(mg/L)	(meq/L)	(mg/L)	(meq/L)	(mg/L)	(meq/L)
<b>Ânions</b>																						
Alcalinidade	91.17	1.49	212.13	3.48	46.30	0.76	50.50	0.83	210.24	3.45	7.90	0.13	18.07	0.30	13.64	0.22	40.33	0.66	135.21	2.22	103.27	1.69
Cloreto	43.48	1.22	26.47	0.75	25.92	0.73	32.21	0.91	21.50	0.61	13.26	0.37	21.41	0.60	21.76	0.61	33.04	0.93	29.55	0.83	27.58	0.78
Nitrato	0.98	0.02	0.07	0.00	0.12	0.00	18.05	0.29	0.18	0.00	0.64	0.01	1.05	0.02	7.48	0.12	5.19	0.08	0.32	0.01	1.55	0.03
Sulfato	32.97	0.69	18.65	0.39	62.35	1.30	11.02	0.23	16.01	0.33	15.55	0.32	7.79	0.16	0.16	0.00	30.20	0.63	60.67	1.26	36.58	0.76
<b>SOMA</b>		<b>3.42</b>		<b>4.61</b>		<b>2.79</b>		<b>2.26</b>		<b>4.39</b>		<b>0.84</b>		<b>1.08</b>		<b>0.84</b>		<b>2.30</b>		<b>4.31</b>		<b>3.23</b>
<b>Cátions</b>																						
Cálcio	0.40	0.02	4.80	0.24	1.00	0.05	0.50	0.03	6.50	0.33	0.30	0.02	0.90	0.05	2.90	0.15	1.60	0.08	23.00	1.15	12.00	0.60
Ferrol	0.55	0.02	1.13	0.04	0.260	0.009	<0,1	<0,003	0.990	0.035	<0,1	<0,003	<0,05	<0,002	<0,05	<0,002	<0,1	<0,003	3.14	0.11	0.180	0.006
Magnésio	0.10	0.01	1.50	0.13	0.10	0.01	<0,1	<0,01	0.90	0.08	<0,1	<0,01	0.10	0.01	0.40	0.03	0.30	0.03	2.40	0.20	1.80	0.15
Potássio	0.80	0.02	11.00	0.28	1.30	0.03	<0,5	<0,01	2.50	0.06	1.20	0.03	<0,5	<0,01	<0,5	<0,01	3.10	0.08	13.00	0.33	13.00	0.33
Sódio	68.00	2.96	82.00	3.57	67.00	2.91	24.00	1.04	24.00	1.04	42.00	1.83	20.00	0.87	17.00	0.74	46.00	2.00	55.00	2.39	49.00	2.13
<b>SOMA</b>		<b>3.03</b>		<b>4.25</b>		<b>3.01</b>		<b>1.07</b>		<b>1.54</b>		<b>1.87</b>		<b>0.92</b>		<b>0.92</b>		<b>2.18</b>		<b>4.19</b>		<b>3.22</b>
Erro (%)		-6.16		-4.06		3.86		<b>-35.72</b>		<b>-47.98</b>		<b>38.19</b>		-7.78		4.41		-2.68		-1.48		-0.18

1,1 - Valores superiores ao erro máximo permitido (>10%).

Erros obtidos pelo balanço iônico dos resultados das análises totais dos poços - Outubro/2005

LABORATÓRIO																		
	PM-01P		PM-03		PM-05		PM-06		PM-08		PM-09		PM-10		PM-10P		PM-11	
Parâmetros	(mg/L)	(meq/L)																
<b>Ânions</b>																		
Alcalinidade	64.62	1.06	214.56	3.52	176.27	2.89	58.52	0.96	27.52	0.45	57.32	0.94	213.36	3.50	50.14	0.82	175.55	2.88
Cloreto	25.67	0.72	66.00	1.86	74.40	2.10	71.00	2.00	9.62	0.27	30.00	0.85	69.90	1.97	99.35	2.80	29.50	0.83
Nitrato	<0.026	<0.0004	<0.026	<0.0004	<0.026	<0.0004	<0.026	<0.0004	3.05	0.05	0.61	0.01	<0.026	<0.0004	5.30	0.09	<0.026	<0.0004
Sulfato	1.63	0.03	4.41	0.09	64.00	1.33	25.50	0.53	8.22	0.17	2.44	0.05	9.25	0.19	11.28	0.24	7.15	0.15
<b>SOMA</b>		<b>1.82</b>		<b>5.47</b>		<b>6.32</b>		<b>3.49</b>		<b>0.94</b>		<b>1.85</b>		<b>5.66</b>		<b>3.94</b>		<b>3.86</b>
<b>Cátions</b>																		
Cálcio	15.00	0.75	5.30	0.27	1.00	0.05	1.10	0.06	0.40	0.02	4.20	0.21	6.90	0.35	2.40	0.12	2.50	0.13
Ferroll	8.80	0.31	8.39	0.30	4.60	0.16	7.10	0.25	0.01	0.0004	13.20	0.47	8.40	0.30	1.35	0.05	<0.01	<0.0004
Magnésio	2.60	0.22	0.60	0.05	0.30	0.03	0.20	0.02	<0.1	<0.008	0.40	0.03	1.50	0.13	0.40	0.03	0.70	0.06
Potássio	2.10	0.05	3.20	0.08	3.70	0.09	1.30	0.03	<0.5	<0.01	0.90	0.02	13.00	0.33	<0.5	<0.01	6.80	0.17
Sódio	25.00	1.09	95.00	4.13	109.00	4.74	46.00	2.00	17.00	0.74	19.00	0.83	93.00	4.04	57.00	2.48	88.00	3.83
<b>SOMA</b>		<b>2.42</b>		<b>4.83</b>		<b>5.07</b>		<b>2.36</b>		<b>0.76</b>		<b>1.56</b>		<b>5.15</b>		<b>2.68</b>		<b>4.18</b>
Erro (%)		14.28		-6.23		-10.93		-19.35		-10.76		-8.26		-4.74		-19.05		4.05

1,1 - Valores superiores ao erro máximo permitido (>10%).

LABORATÓRIO																		
	PM-12		PM-58		PM-13		PM-14		PM-15		PM-18		PM-19		PM-20		PP-02	
Parâmetros	(mg/L)	(meq/L)																
<b>Ânions</b>																		
Alcalinidade	159.05	2.61	33.20	0.54	80.42	1.32	12.20	0.20	106.92	1.75	296.86	4.87	196.11	3.21	18.76	0.31	13.63	0.22
Cloreto	38.90	1.10	35.70	1.01	63.34	1.78	50.20	1.41	31.45	0.89	52.10	1.47	56.40	1.59	39.50	1.11	30.80	0.87
Nitrato	2.05	0.03	<0.026	<0.0004	<0.026	<0.0004	0.83	0.01	1.46	0.02	<0.026	<0.0004	<0.026	<0.0004	4.00	0.06	23.61	0.38
Sulfato	30.13	0.63	35.80	0.75	13.35	0.28	5.46	0.11	6.79	0.14	3.39	0.07	84.30	1.76	15.11	0.31	0.24	0.01
<b>SOMA</b>		<b>4.36</b>		<b>2.30</b>		<b>3.38</b>		<b>1.74</b>		<b>2.80</b>		<b>6.40</b>		<b>6.56</b>		<b>1.80</b>		<b>1.48</b>
<b>Cátions</b>																		
Cálcio	0.40	0.02	0.40	0.02	2.50	0.13	<0,1	<0,005	0.10	0.01	16.00	0.80	0.30	0.02	0.50	0.03	2.10	0.11
Ferroll	<0.01	<0.0004	2.92	0.10	<0.01	<0.0004	<0.01	<0.0004	<0.01	<0.0004	1.05	0.04	5.43	0.19	0.05	0.00	<0.01	<0.0004
Magnésio	<0.1	<0.008	<0.1	<0.008	1.00	0.08	<0.1	<0.008	<0.1	<0.008	2.20	0.18	<0.1	<0.008	<0.1	<0.008	0.40	0.03
Potássio	3.40	0.09	0.60	0.02	8.70	0.22	<0.5	<0.01	0.70	0.02	8.90	0.23	2.30	0.06	<0.5	<0.01	<0.5	<0.01
Sódio	94.00	4.09	66.00	2.87	86.00	3.74	33.00	1.43	73.00	3.17	105.00	4.57	115.00	5.00	31.00	1.35	25.00	1.09
<b>SOMA</b>		<b>4.19</b>		<b>3.01</b>		<b>4.17</b>		<b>1.43</b>		<b>3.20</b>		<b>5.81</b>		<b>5.27</b>		<b>1.37</b>		<b>1.23</b>
Erro (%)		-1.98		13.45		10.46		-9.65		6.55		-4.83		-10.92		-13.39		-9.31

1,1 - Valores superiores ao erro máximo permitido (>10%).

LABORATÓRIO														
	PP-03		PP-06		LAGO N		S-49		PZ-02		PZ-03		PZ-05	
Parâmetros	(mg/L)	(meq/L)												
<b>Ânions</b>														
Alcalinidade	76.04	1.25	84.01	1.38	128.53	2.11	13.40	0.22	22.26	0.36	48.71	0.80	328.38	5.38
Cloreto	67.10	1.89	82.50	2.32	84.09	2.37	23.87	0.67	71.10	2.00	78.20	2.20	74.50	2.10
Nitrato	4.90	0.08	0.80	0.01	<0.026	<0.0004	5.44	0.09	<0.026	<0.0004	<0.026	<0.0004	<0.026	<0.0004
Sulfato	36.60	0.76	97.90	2.04	153.90	3.21	1.58	0.03	57.90	1.21	23.83	0.50	2.40	0.05
<b>SOMA</b>		<b>3.98</b>		<b>5.75</b>		<b>7.68</b>		<b>1.01</b>		<b>3.57</b>		<b>3.50</b>		<b>7.53</b>
<b>Cátions</b>														
Cálcio	2.10	0.11	4.70	0.24	13.00	0.65	1.10	0.06	3.70	0.19	0.70	0.04	15.00	0.75
Ferroll	2.57	0.09	3.88	0.14	0.18	0.01	<0.01	<0.0004	2.19	0.08	0.74	0.03	0.41	0.01
Magnésio	0.40	0.03	0.70	0.06	2.10	0.18	<0.1	<0.008	0.80	0.07	<0.1	<0.008	3.00	0.25
Potássio	2.40	0.06	6.00	0.15	18.00	0.46	0.90	0.02	9.10	0.23	0.70	0.02	13.00	0.33
Sódio	68.00	2.96	99.00	4.30	101.00	4.39	14.00	0.61	95.00	4.13	58.00	2.52	113.00	4.91
<b>SOMA</b>		<b>3.25</b>		<b>4.89</b>		<b>5.68</b>		<b>0.69</b>		<b>4.69</b>		<b>2.60</b>		<b>6.26</b>
Erro (%)		-10.10		-8.11		-14.95		-19.18		13.54		-14.70		-9.21

1,1 - Valores superiores ao erro máximo permitido (>10%).

**ANEXO X**  
**RESULTADOS DE PARÂMETROS QUÍMICOS E**  
**FÍSICO-QUÍMICOS NAS ÁGUAS SUPERFICIAL E**  
**SUBTERRÂNEA**

Pontos Amostrados	Jul/03	Jul-04			
	Boro (mg/L)	Boro (mg/L)	pH	C.E. (uS/cm)	Temp. (°C)
PM-01	0.20	0.14	5.58	275.00	25.00
PM-01P		0.05	5.92	1592.00	25.30
PM-02	0.20	0.05	5.75	176.30	23.00
PM-03	0.72	0.55	6.14	513.00	24.00
PM-04	0.73	0.80	5.14	174.20	25.00
PM-05	0.93	0.97	6.43	670.00	25.00
PM-06	0.28	0.41	6.10	344.00	25.00
PM-07	0.60	0.56	6.51	588.00	25.00
PM-08		0.05	5.75	795.80	23.00
PM-09		0.05	6.21	186.50	25.00
PM-10		1.30	7.10	813.00	22.00
PM-10P		0.21	5.29	19.00	23.80
PM-11		1.30	6.40	629.00	24.00
PM-12		1.32	6.20	461.00	25.00
PM-58		0.35	6.10	388.00	24.00
PM-13		1.49	6.67	514.00	23.00
PM-14		0.48	6.20	390.00	24.00
PM-15		0.11	6.41	225.00	24.00
PM-16		0.09	5.31	98.20	25.00
PM-17		0.77	6.59	622.00	25.00
PM-18		0.72	6.54	563.00	23.50
PM-19		0.83	6.21	476.00	23.00
PM-20		0.05	5.51	189.80	25.00
PP-01	0.20	0.05	6.31	224.00	25.00
PP-02	0.20				
PP-03	0.30	0.10	6.00	319.00	24.00
PP-06	1.18				
PP-07	1.26	0.65	6.60	799.00	24.00
PZ-02					
PZ-03					
PZ-05					
S-48					
Lago N	3.23	0.58	9.36	2000.00	26.30
Lago SE	3.49	0.59	9.22	2000.00	26.00

- não analisado

Mar-05														
Pontos Amostrados	pH	C.E. (uS/cm)	Temp. (°C)	Eh (mV)	Alcalinidade (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	Boro (mg/L)	Fe <sup>2+</sup> (mg/L)	Na <sup>+</sup> (mg/L)	K (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)
PM-01	5.63	140.40	26.20	171.00	10.79	0.06	0.28	32.00	1.10	0.80	0.40	27.88	13.16	6.24
PM-01P	6.13	192.50	26.00	0.00	48.06	0.05	0.52	19.00	2.20	13.00	2.40	32.22	58.63	1.44
PM-02														
PM-03	6.21	503.00	23.80	-21.00	172.64	0.70	0.10	107.00	3.20	4.20	0.50	52.09	210.60	13.22
PM-04														
PM-05	5.93	439.00	24.20	40.00	86.81	0.96	0.48	98.00	4.10	0.90	0.30	33.08	105.89	61.16
PM-06	5.96	260.00	27.30	-1.00	64.05	0.27	1.04	37.00	2.10	2.90	0.50	20.07	78.14	12.04
PM-07														
PM-08	5.67	89.70	24.60	198.00	21.09	0.05	0.05	4.30	<0,5	0.40	<0,1	9.29	25.73	3.92
PM-09	5.50	599.00	24.90	259.00	16.87	0.05	0.05	11.00	0.90	1.30	0.20	3.11	20.58	5.99
PM-10	6.65	458.00	24.30	-93.00	157.04	1.66	1.26	106.00	5.80	2.20	0.50	22.99	191.58	42.15
PM-10P	5.94	427.00	24.30	-84.00	102.70	0.89	0.43	93.00	0.80	4.10	0.80	50.43	125.29	22.60
PM-11	6.71	454.00	25.10	-17.00	187.35	1.46	0.70	84.00	6.10	2.00	0.60	29.21	228.56	12.18
PM-12	5.39	252.00	23.90	219.00	11.57	0.13	0.10	53.00	1.90	1.00	0.20	70.53	14.09	1.73
PM-58	5.80	340.00	26.80	-19.00	74.75	0.43	0.55	68.00	0.80	0.40	0.10	43.48	91.17	32.97
PM-13	6.64	443.00	24.40	-35.00	173.92	1.44	1.13	82.00	11.00	4.80	1.50	26.47	212.13	18.65
PM-14	5.94	298.00	25.30	118.00	37.96	0.76	0.26	67.00	1.30	1.00	0.10	25.92	46.30	62.35
PM-15	5.81	236.00	25.40	208.00	41.39	0.45	0.10	24.00	<0,5	0.50	<0,1	32.21	50.50	11.02
PM-16														
PM-17														
PM-18	6.36	411.00	22.40	-44.00	172.35	0.68	0.99	24.00	2.50	6.50	0.90	21.50	210.24	16.01
PM-19	5.38	31.50	23.30	226.00	6.47	0.27	0.10	42.00	1.20	0.30	<0,1	13.26	7.90	15.55
PM-20	5.38	115.50	25.50	212.00	14.81	0.05	0.05	20.00	<0,5	0.90	0.10	21.41	18.07	7.79
PP-01						0.00								
PP-02	5.23	107.00	24.70	258.00	11.18	0.05	0.05	17.00	<0,5	2.90	0.40	21.76	13.64	0.16
PP-03	5.65	250.00	24.60	159.00	33.06	0.06	0.10	46.00	3.10	1.60	0.30	33.04	40.33	30.20
PP-06	6.44	435.00	21.10	-40.00	110.84	0.97	3.14	55.00	13.00	23.00	2.40	29.55	135.21	60.67
PP-07														
PZ-02														
PZ-03														
PZ-05														
S-48														
Lago N	9.79	340.00	30.90	94.00	84.65	0.16	0.18	49.00	13.00	12.00	1.80	27.58	103.27	36.58
Lago SE														

- não analisado

Oct-05															
Pontos Amostrados	pH (HANNA / WTW)	C.E. (uS/cm) - WTW	TDS (ppm) - HANNA	Temp. (°C) - WTW	Eh (mV) - HANNA	Alcalinidade (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	Boro (mg/L)	Fe <sup>2+</sup> (mg/L)	Na <sup>+</sup> (mg/L)	K (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)
PM-01															
PM-01P	6.32	226.00	142.00	24.60	16.00	52.97	0.06	8.80	25.00	2.10	15.00	2.60	25.67	64.62	1.63
PM-02															
PM-03	6.67	450.00	249.00	23.50	-14.00	175.88	0.66	8.39	95.00	3.20	5.30	0.60	66.00	214.56	4.41
PM-04															
PM-05	6.39	442.00	251.00	23.60	51.00	144.49	0.99	4.60	109.00	3.70	1.00	0.30	74.40	176.27	64.00
PM-06	5.93	247.00	139.00	25.10	53.00	47.97	0.18	7.10	46.00	1.30	1.10	0.20	71.00	58.52	25.50
PM-07															
PM-08	5.85	76.00	40.00	23.20	208.00	22.56	0.01	0.01	17.00	<0.5	0.40	<0.1	9.62	27.52	8.22
PM-09	6.27	163.00	93.00	22.70	13.00	46.99	0.03	13.20	19.00	0.90	4.20	0.40	30.00	57.32	2.44
PM-10	6.80	440.00	263.00	21.50	-66.00	174.90	1.05	8.40	93.00	13.00	6.90	1.50	69.90	213.36	9.25
PM-10P	5.78	293.00		22.70	43.00	41.10	0.29	1.35	57.00	<0.5	2.40	0.40	99.35	50.14	11.28
PM-11	6.52	425.00		23.90		143.90	0.85	0.01	88.00	6.80	2.50	0.70	29.50	175.55	7.15
PM-12	6.49	430.00		25.70		130.76	1.10	0.01	94.00	3.40	0.40	<0.1	38.90	159.05	30.13
PM-58	6.15	288.00	168.00	24.70	61.00	27.27	0.44	2.92	66.00	0.60	0.40	<0.1	35.70	33.20	35.80
PM-13	6.81	410.00		23.00		65.97	0.72	0.01	86.00	8.70	2.50	1.00	63.34	80.42	13.35
PM-14	5.31	167.00		24.50		10.01	0.11	0.01	33.00	<0.5	<0.1	<0.1	50.20	12.20	5.46
PM-15	6.43	300.00		24.10		87.69	0.92	0.01	73.00	0.70	0.10	<0.1	31.45	106.92	6.79
PM-16															
PM-17															
PM-18	6.89	566.00		23.90		243.56	1.00	1.05	105.00	8.90	16.00	2.20	52.10	296.86	3.39
PM-19	6.77	482.00	255.00	24.70	-21.00	160.87	0.88	5.43	115.00	2.30	0.30	<0.1	56.40	196.11	84.30
PM-20	5.60	143.00	80.00	23.70	187.00	15.40	0.03	0.05	31.00	<0.5	0.50	<0.1	39.50	18.76	15.11
PP-01															
PP-02	5.62	145.00	75.00	24.80	169.00	11.18	0.10	0.01	25.00	<0.5	2.10	0.40	30.80	13.63	0.24
PP-03	6.26	323.00	167.00	24.80	96.00	62.39	0.09	2.57	68.00	2.40	2.10	0.40	67.10	76.04	36.60
PP-06	6.69	509.00	271.00	23.20	1.00	68.96	1.30	3.88	99.00	6.00	4.70	0.70	82.50	84.01	97.90
PP-07							0.00	0.00							
PZ-02	6.51	467.00		14.50	28.00	18.24	0.64	2.19	95.00	9.10	3.70	0.80	71.10	22.26	57.90
PZ-03	5.71	253.00		18.20	-35.00	39.92	0.46	0.74	58.00	0.70	0.70	<0.1	78.20	48.71	23.83
PZ-05	6.87	627.00		16.40	89.00	269.16	0.81	0.41	113.00	13.00	15.00	3.00	74.50	328.38	2.40
S-48	5.69	82.00		25.10		10.99	0.06	0.01	14.00	0.90	1.10	<0.1	23.87	13.40	1.58
Lago N	9.14	558.00		15.90	66.00	105.35	0.19	0.18	101.00	18.00	13.00	2.10	84.09	128.53	153.90
Lago SE															

- não analisado